



TITLE:

マサ土の粒子破碎特性とその石灰
安定処理に関する基礎的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

澤, 孝平

CITATION:

澤, 孝平. マサ土の粒子破碎特性とその石灰安定処理に関する基礎的研究. 京都大学, 1982, 工学博士

ISSUE DATE:

1982-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4606>

RIGHT:

マサ土の粒子破碎特性とその石灰
安定処理に関する基礎的研究

昭和56年 4 月

澤 孝 平

マサ土の粒子破碎特性とその石灰 安定処理に関する基礎的研究

昭和56年 4 月

澤 孝 平

目 次

第 1 章 緒 論	1
1.1 研究の背景と問題点	1
1.2 研究の目的と内容	4
参 考 文 献	7
第 2 章 マサ土の風化特性の判定に関する研究	9
2.1 概 説	9
2.2 マサ土粒子の風化特性	9
2.3 種々の風化特性の判定法	12
2.3.1 風化形式の判定	12
2.3.2 風化度の判定	13
2.4 風化花崗岩の破断面観察に基づく風化形式の判定およびその表示 方法	18
2.4.1 風化の量的表示と引張り強度	18
2.4.2 破断面観察に基づく風化形式の判定	24
2.5 色調による風化度の判定	32
2.5.1 色調の表示方法	32
2.5.2 試料および色の測定方法	33
2.5.3 有色鉍物量と色調の関係	36
2.5.4 風化度と色調の関係	42
2.5.5 色調によるマサ土の有色鉍物量と風化度の判定	45
2.6 結 語	47
参 考 文 献	48
第 3 章 マサ土粒子の破碎特性に関する研究	51
3.1 概 説	51
3.2 土粒子の破碎実験方法および破碎性の表示方法	51

3.2.1	試料と実験方法	51
3.2.2	破碎性の表示方法と破碎形式	52
3.3	破碎仕事量と破碎性の関係	55
3.4	単一粒径の各鉱物の破碎性	57
3.5	鉱物混在による選択破碎	61
3.6	混合粒径試料の破碎性	66
3.7	結 語	70
	参 考 文 献	71
第4章	土粒子の破碎性と締固め特性の関係に関する研究	73
4.1	概 説	73
4.2	試料および実験方法	73
4.3	突固め仕事量と土粒子破碎性の関係	75
4.4	土粒子破碎と締固め特性	81
4.4.1	含水比と破碎性の関係	81
4.4.2	密度と破碎性の関係	84
4.5	結 語	87
	参 考 文 献	89
第5章	マサ土の石灰安定処理における土粒子破碎の影響に関する研究	90
5.1	概 説	90
5.2	試料および実験方法	92
5.3	土粒子破碎による安定処理効果	95
5.3.1	未破碎および低破碎試料土の安定処理	95
5.3.2	高破碎試料土の安定処理	97
5.4	細粒分の量および質による安定処理効果	101
5.4.1	細粒分の量と安定処理効果	101
5.4.2	細粒分の性質と安定処理効果	107
5.4.3	フライアッシュの添加による安定処理効果	109

5.5	締固め密度と安定処理効果	114
5.6	石灰安定処理の最適配合の推定	117
5.6.1	各成分の容積と容積比の算出	117
5.6.2	石灰およびフライアッシュの最適添加量の推定	122
5.7	結 語	126
	参 考 文 献	128
第6章	結 論	129
	謝 辞	133
	記 号	134

第1章 緒 論

1.1 研究の背景と問題点

わが国の風土の特徴は多雨多湿で、急峻な山地地形が多く、地形、地質ともに複雑である。そして、多くの特殊土と呼ばれる土が存在する。新潟平野に代表される液状化しやすい砂、北海道を中心に分布する高有機質土、九州のシラス、関東ロームに代表される火山灰質粘性土、および最近になって注目されてきたヘドロなどの超軟弱粘土とともに、本研究の対象土であるマサ土はわが国の代表的な特殊土である。

特殊土という言葉が使われ出したのはそれほど古くからのことではない。特殊土の定義として、三木¹⁾はつぎのように述べている。すなわち「特殊土とは、土質基礎工学の教科書などに書かれているふつうの土とはその性質がいろいろな意味で違ったところがあり、しかも現場ではよく出会ってその取扱いが問題となる土である。」

マサ土の特殊性はその成因にある。すなわち、マサ土とは「花崗岩質岩石（花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩など）の結晶性深成岩、半深成岩またはこれと同質の片麻岩が風化してその場所に残留している残積土およびこれからもたらされた崩積土である」と定義されている。²⁾ だから、花崗岩質岩石の存在するところには必ずマサ土が存在するはずである。しかし、水による分級を受けたものは除外しているので侵食作用の影響の多いところでは、当然マサ土層は存在しえない。図1・1³⁾はマサ土とともに、上記の特殊土の分布を示したものである。この図より、マサ土はおもに近畿地方、中国地方、四国北部、九州北部に多く分布することがわかる。

外国におけるマサ土の分布を示す十分な資料はないが、花崗岩類の風化残積土に関する報告は多い。東南アジア、とくに香港^{4), 5)}、シンガポール⁶⁾、朝鮮半島には広く分布しているようである。そのほかにもブラジル^{7), 8)}、オーストラリア^{9), 10)}、南アフリカ¹¹⁾、スーダン¹²⁾などの風化花崗岩やマサ土に関する研究が発表されて

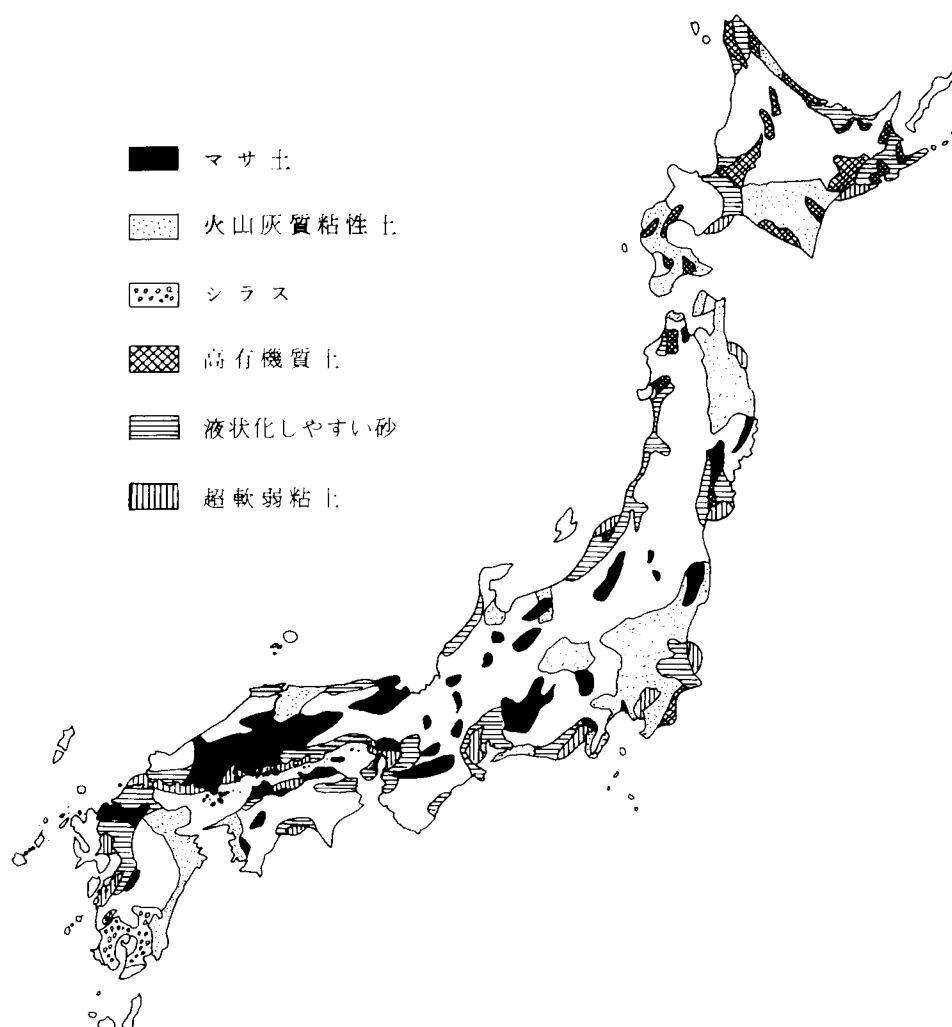


図1・1 日本における特殊土の分布

いる。

わが国では昭和30年代後半から昭和40年代にかけてのいわゆる高度成長時代に、このマサ土地帯で大規模な開発がなされた。名神高速道路、中国縦貫高速道路などの各地の道路工事、山陽新幹線の建設、神戸市の宅地造成と海岸埋立、人工島の建設などである。これらの建設工事を遂行する上には、マサ土の工学的な性質を的確に把握する必要があった。マサ土に関する工学的な研究はこの時期以降に大いに発展し、数々の成果があげられている。

その中でも特筆すべきものは、松尾・西田の一連の研究である。彼らはマサ土

の物理的，化学的および工学的性質を決定するものが風化度と鉱物組成であることに着目し，各種のマサ土について研究し，工学的な分類を行っている。¹³⁾ また，透水性，せん断特性，締固め特性について明らかにし，ソイルセメントの特性の研究も行っている。¹⁴⁾ 田中¹⁵⁾はマサ土の自然斜面の崩壊のメカニズムを追究し，浸透流と崩壊の関係を明らかにした。谷本¹⁶⁾は振動を受けたときのマサ土の挙動の解明にあたり，マサ土の液状化について明らかにした。松尾・宋¹⁷⁾はマサ土の安定処理を行い，その効果を微視的，構造的に追究した。また，福田¹⁸⁾はマサ土地盤の浸水時の挙動に注目して浸水せん断試験を行い，浸水時のマサ土の強度低下と沈下現象を解明した。松尾・福本¹⁹⁾はマサ土粒子の破碎性を研究し，透水性，締固め特性との関係を明らかにした。

一般にマサ土が特殊土といわれている理由は以下のような特性に起因しており，²⁰⁾従来の研究もこれらの特性の解明とその対策が主題となっている。

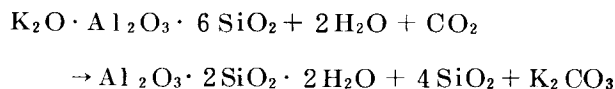
(1) 風化の程度と鉱物組成の違いにより工学的性質が異なる。

マサ土は新鮮な岩に近いものから，軟らかい土まで広い範囲を含んでいるので，風化の程度が重要な要因となる。この風化の程度を表わす指標は，多くの研究者がそれぞれに工夫して開発しているが，複雑なマサ土の性質を表現するものとして確立されたものはないのが現状である。

一方，マサ土中の鉱物としては，母岩を構成している一次鉱物として石英，長石および有色鉱物（黒雲母，角閃石など）と，二次鉱物の粘土鉱物が存在する。一次鉱物は風化によりつぎのように変化する。²¹⁾

石英：細粒化するが，化学的変質は起らない。

長石：正長石は水および炭酸ガスとつぎのように反応して粘土鉱物となる。



斜長石は正長石より分解しやすく，カオリナイトやギブサイトになる。

雲母：イオン交換や溶解によって，イライト，クロライト，バーミキュライトやハロイサイトに変化する。

地質岩石学的に，花崗岩は領家型花崗岩と白亜紀型花崗岩に区分されるが，

前者の方が有色鉱物を多く含み、粘着性に富むマサ土を産出する。これに対して、後者のマサ土は有色鉱物が少なく、粘着性に乏しい。

(2) 土粒子が破碎しやすい。

風化途上にある土粒子は不安定な状態にあり、小さい力で破壊する。この粒子破碎の問題は、土の工学的性質たとえばせん断特性、締固め特性、透水性との関係で注目され、数々の研究がみられる。

Lee ら²²⁾、三浦ら²³⁾は高圧せん断試験下の川砂や標準砂の破碎特性を研究し、塑性的仕事と粒子破碎量の関係を明らかにし、マサ土へも適用できることを示している。西田ら²⁴⁾は高圧三軸試験におけるマサ土の破碎特性を研究し、風化に伴う土粒子内空隙と粒子破碎を関係づけて、せん断強度を考察している。松尾ら^{19), 25)}はマサ土の破碎性が締固め特性、透水性に及ぼす影響を研究し、粒子破碎に伴う密度の増加量、透水性の低下量を算定している。いずれも、破碎粒子が土の強度、密度、透水性に及ぼす影響を実験的に研究したものである。

(3) 水に対する安定性が低い。

降雨や浸透流により、マサ土地盤が崩壊する例は枚挙にいとまない。この特性は、(1)の特性に由来するもので、重要な研究テーマとなっている。

1.2 研究の目的と内容

本研究は、前節で述べたマサ土の特性のうち、(1)風化特性と(2)土粒子破碎特性について解明するものである。そして、これらの特性がマサ土の締固め特性に及ぼす影響について明らかにし、さらに土質安定との関連性を追究するものである。

風化作用は一般に物理的風化と化学的風化に大別され、両者は相互に関係しながら岩石を崩壊・変質させていく。したがって、従来からこの二つの風化形式を分離する試みは少なかった。しかし、風化形式により鉱物の変化が異なることから、風化形式は風化の程度とともに、マサ土の工学的性質を決定する重要な要素となる。本研究の第一の目的は、マサ土粒子の風化特性を明らかにし、風化形式の判定に適切な指標を与えることである。

風化に伴う鉱物の変質は、土粒子破碎に直接的に影響する。したがって、上記の風化形式に基づく鉱物の変質状態から、粒子破碎の現象を解明することは重要である。本研究の第二の目的は、各種鉱物の混合物であるマサ土粒子の破碎特性を実験的に解明し、あわせて、締固め時の粒子破碎特性を明らかにすることである。

さらに、第三の目的は、破碎性粒子の安定処理に関して、細粒子の影響を明らかにすることである。マサ土の安定処理工法としては、従来からソイルセメントが多く使用されている。しかし、破碎性粒子がソイルセメントの強度に影響を及ぼし、細粒分の多いマサ土には適用しにくい面があった。一方、石灰による安定処理は砂質土よりもむしろ細粒分の多い粘性土に適用される。そこで、破碎性粒子を含むマサ土について、消石灰による安定処理の可能性を追究し、その実用化を図ろうとするものである。

以上の目的を有する本論文は六つの章からなっている。以下に、第1章から第6章にいたる本論文の論述の過程を明らかにする。

第1章では、特殊土としてのマサ土の性質を明らかにするため、マサ土の定義と分布を述べ、この分野における研究を概観して、マサ土の特殊性と問題点を指摘した。そして、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、まず風化に伴うマサ土粒子の欠陥状態を微視的に明らかにする。つぎにマサ土の風化特性の判定法として、従来から提案されている方法を整理する。その多くは地質学や農学の分野で研究されたものであり、工学的指標は少ない。また、風化形式を表示する手法はほとんどみられない。そこで第2章ではつぎに、新しい二つの判定法を提案する。

その一つは風化岩の引張り試験による破断面の観察に基づく方法であり、破断面に存在する母岩構成鉱物の割合によって風化形式を判定する。もう一つは色調による判定法である。これは乾燥状態のマサ土を粉碎して色を測定し、マサ土の風化度と有色鉱物量を同時に決定するものである。

第3章では、土粒子の破碎のメカニズムを解明するために、落下法による破碎試験を実施する。粒子破碎は粒子強度、すなわち風化の形式と程度に関係がある。破碎性の表示は破碎前後の粒径分布から破碎率、移動率を求めて、それぞれ破碎の

量と質を表示する。そして、これらによって、粒子破碎の形式を論じ、風化との関係を明らかにする。さらに、鉱物の違いによる破碎性の相違から選択破碎の様子を解明する。

第4章では、第3章の結果を踏まえて、突固めによる締固め試験実施時の破碎性を考察する。まず、仕事量と破碎性の関係を示す。また、従来の研究では粒子がもっとも破碎するのは最適含水比より大きい場合と小さい場合と両方の結論がでているので、締固め特性と破碎性の関係の中で、含水比の差異による破碎性の変化を明らかにする。さらに、乾燥密度と破碎率との関係から、突固め仕事量のうち、密度増大に消費される仕事量と粒子破碎に消費される仕事量を分けて、各々の分担について考える。

第5章では、破碎性粒子の安定処理という考え方から、石灰安定処理を取上げる。まず粒子破碎を起したマサ土と、起さないマサ土について、いずれの土の安定処理が容易かを考える。そして、マサ土内の細粒分（ここでは 74μ 以下）の量と質の影響について考察する。消石灰とマサ土との反応は炭酸化作用による固結が主であるが、それ以外にポゾラン反応がある。そこで、つぎに積極的にポゾラン反応を起すと考えられるフライアッシュを副添加材として加えた場合の影響を明らかにし、石灰やフライアッシュの最適配合量の推定方法を提案する。

最後に、第6章として本研究の成果を総括して、今後の問題点、展望等を示している。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：日本の特殊土，土質工学ライブラリー10， p.2， 1974.
- 2) 西田一彦：マサ土の基本的性質，土質工学会マサ土研究委員会編マサ土の工学的性質とその取扱い指針， pp. 1 ~ 31， 1970.
- 3) Matsuo, S.: Deposits in Japan, State of the Art in the 5th Asian Reg. Conf. on S. M. F. E., pp. 1 ~ 20, 1975.
- 4) Ruxton, B. P. and Berry, L.: Weathering of Granite and Associated Erosional Feature in Hong Kong, Bul. Geol. Soc. America, Vol. 68, pp. 1263 ~ 1291, 1957.
- 5) Lumb, P.: The Residual Soils of Hong Kong, Geotechnique, Vol. 15, No.2, pp. 180 ~ 194, 1965.
- 6) 有田藤雄：シンガポール東海岸埋立工事の工法，建設の機械化，No. 202， pp. 22 ~ 25, 1966.
- 7) Cruz, P.: Engineering Properties of Some Residual Compacted Soils, Proc. of the 7th Int. Conf. on S. M. F. E., pp. 99 ~ 100, 1969.
- 8) Garga, V. K. and Costa, C. A.: Stress - Compressibility Characteristics of Residual Soil from Gneiss, Proc. of the 9th Int. Conf. on S. M. F. E., Vol. 1, pp. 105 ~ 108, 1977.
- 9) Stephen, I.: A Study of Rock Weathering with Reference to the Soils of Malvern Hills, Jour. Soil Science, Vol. 3, No. 2, pp. 219 ~ 236, 1952.
- 10) Magee, D. O. A.: The Behaviour of Decomposed Granites of the Snowy Mountains Area as Pavement Materials, Proc. of the 3rd Aust. New Zealand Conf. on S. M. F. E., pp. 111 ~ 116, 1960.
- 11) Brink, A. B. A. and Kantey, B. A.: Collapsible Grain Structure in Residual Granite Soil in Southern Africa, Proc. of the 5th Int. Conf. on S. M. F. E., Vol. 1, pp. 611 ~ 614, 1957.
- 12) Ruxton, B. P.: Weathering and Subsurface Erosion in Granite at the Piedmont Angle, Balos, Sudan, Geol. Magazine, Vol. 95, No. 5, pp. 353 ~ 377, 1958.

- 13) Matsuo, S. and Nishida, K. : Physical and Chemical Properties of the Decomposed Granite Soil Grains, Soils and Foundations, Vol. 8 , No. 4 , pp. 10 ~ 20 , 1968 .
- 14) Matsuo, S. and Nishida, K. : The Properties of Decomposed Granite Soils and their Influence on Portland Cement Stabilization, Soils and Foundations, Vol. 9 No. 2 , pp. 35 ~ 43 , 1969 .
- 15) 田中茂：斜面の安定，土質工学会マサ土研究委員会編マサ土の工学的性質とその取扱い指針， pp. 99 ~ 132 , 1970 .
- 16) 谷本喜一：マサ土の工学的性質について・動的性質，第18回土質工学シンポジウム発表論文集，土質工学会， pp. 45 ~ 50 , 1973 .
- 17) 松尾新一郎，宋永焜：X線および電子顕微鏡による石灰安定処理土の構造的な研究，土木学会論文報告集，No. 193 , pp. 59 ~ 68 , 1971 .
- 18) 福田護，中澤重一：盛土地盤の浸水に伴う沈下とその解析について，土質工学会論文報告集，Vol. 17 , No. 2 , pp. 65 ~ 75 , 1977 .
- 19) 松尾新一郎，福本武明：マサ土の透水性に及ぼす粒子破砕の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 17 , No. 1 , pp. 87 ~ 97 , 1977 .
- 20) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土の調査・試験法とその適応，施工技術，第9巻，第1号， pp. 97 ~ 104 , 1976 .
- 21) Matsuo, S., Fukuda, M. and Sawa, K. : The Actual State of Decomposed Granite in Japan, Proc. of the 5th Asian Reg. Conf. on S. M. F. E. , pp. 51 ~ 59 , 1975 .
- 22) Lee, K. L. and Seed, H. B. : Drained Strength Characteristics of Sand , Proc. A. S. C. E., Vol. 97 , No. SM6 , pp. 117 ~ 141 , 1967 .
- 23) Miura, N. and Ohara, S. : Particle -Crushing of a Decomposed Granite Soil under Shear Stresses, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 3, pp. 1~14, 1979.
- 24) 西田一彦，香川満：マサ土粒子の破砕とせん断特性，第27回土木学会年次学術講演会概要集（第3部）， pp. 569 ~ 572, 1972 .
- 25) 松尾新一郎，福本武明：まさ土の締固め密度と透水性に及ぼす粒子破砕の影響，土質工学会論文報告集， Vol. 19 , No. 2 , pp. 95 ~ 101 , 1979 .

第2章 マサ土の風化特性の判定に関する研究

2.1 概 説

岩石から土への風化作用は物理的風化と化学的風化に大別でき、両者が相互に関係しながら岩石を崩壊、分解させていく。¹⁾ 物理的風化の原因となるものは、地かく変動、凍結融解作用、温度変化などであり、圧力や熱が岩石を各鉱物粒子へ分離させる。化学的風化は水やガスと岩石を構成している鉱物との間の化学的反応、すなわち加水分解、脱塩基作用、炭酸化作用などの形で進行する。石英、白雲母などが分解されにくく、長石、黒雲母が分解されやすい。その他、動物や植物が働きかける生物的風化を別枠にあげることもあるが、風化作用としては、物理的または化学的な作用のどちらかに分けることができる。

マサ土は風化残積土であるため、その工学的性質が風化特性によって大きく変化するとともに、風化層の厚さや分布が母岩の岩質ならびに構造に大きく依存する。したがって、マサ土の風化の形式、程度、厚さ、分布ならびに不均質さを把握することは重要なことである。

本章では、まず風化に伴うマサ土粒子の欠陥状態を微視的に明らかにする。ついで、従来から試みられている風化特性の判定法を整理し、さらに風化形式、風化度の判定法を実験的に考察する。

2.2 マサ土粒子の風化特性

マサ土粒子は花崗岩質岩石が風化したものであり、個々の粒子に風化の痕跡をみることができる。

比叡山のマサ土粒子の表面を走査電子顕微鏡にて観察した結果が写真 2・1 ～ 2・8 である。²⁾

写真 2・1 ～ 2・4 は長石粒子の表面状態を示している。写真 2・1 は、風化のあまり進んでいない試料で、長石粒子の結晶性に基づくへき開性が明確であり、クラ

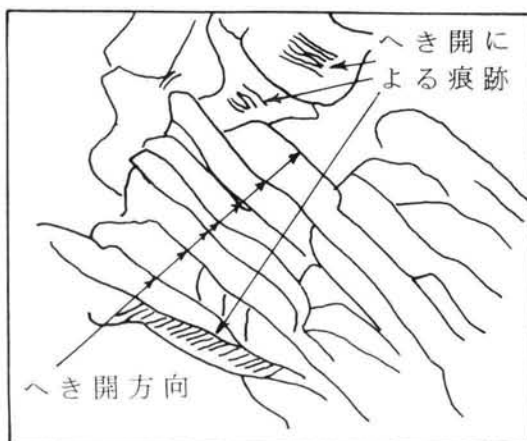
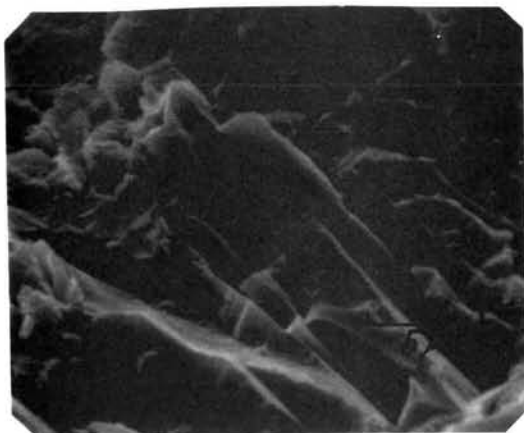


写真2・1 長石粒子のへき開性

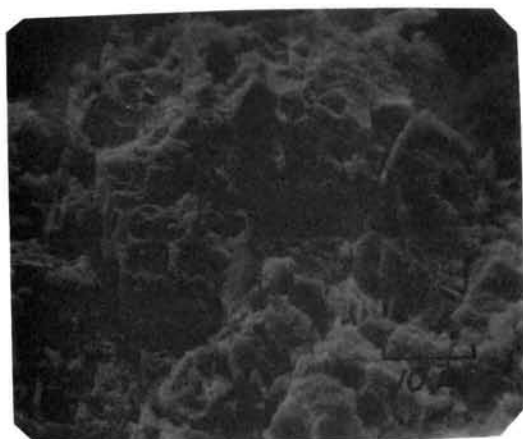


写真2・2 長石粒子のクラック

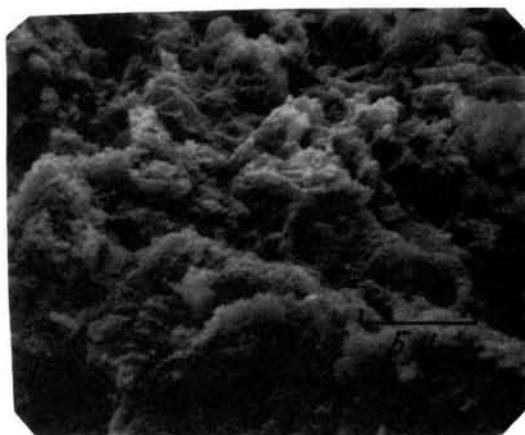


写真2・3 長石粒子の粘土化

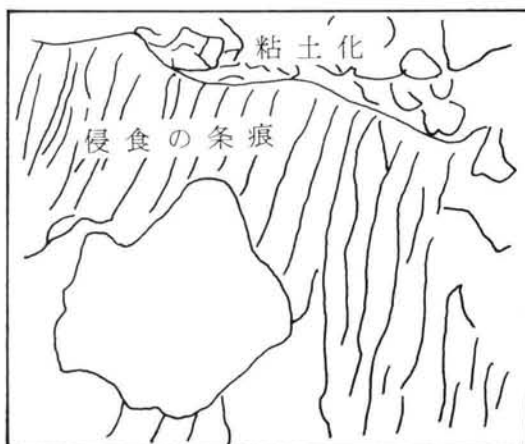
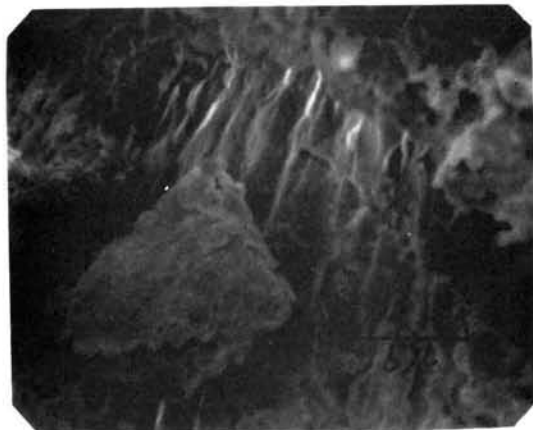


写真2・4 長石粒子の慢食による条痕

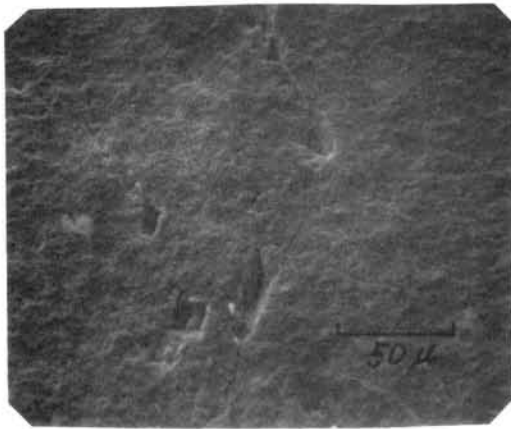


写真 2・5 石英粒子の微小欠陥とクラック

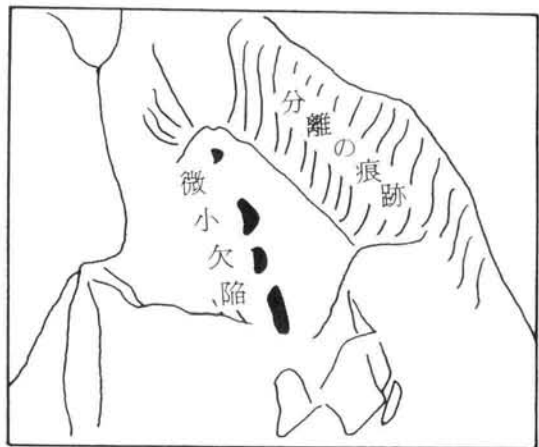
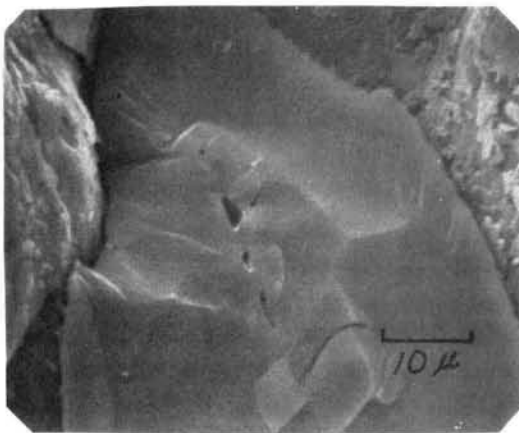


写真 2・6 石英粒子の分離による痕跡

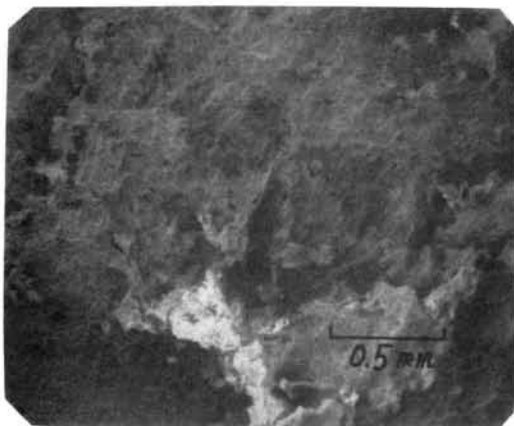


写真 2・7 強風化の長石粒子

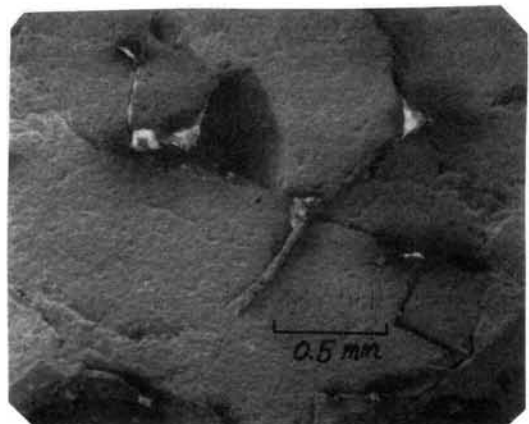


写真 2・8 強風化の石英粒子

ックもへき開の方向に発達している。また、表面はきれいな面を呈しており、粘土のような微細粒子は存在しない。へき開面には、へき開の際に刻まれた縞状の痕跡がみられる。風化が進むとへき開方向ばかりでなく、写真 2・2 のようにあらゆる方向にクラックが発達していく。さらに風化が進むと、もはや結晶性は崩れ、最終的に粘土化する（写真 2・3）。そして写真 2・4 のように、化学的に侵食されたと考えられる条痕がみられる。

写真 2・5、2・6 は石英粒子の表面である。石英の場合は、長石のように風化の進行に伴うクラックの質的な相違はみられず、クラックの量が増大するようである。石英のクラックは写真 2・5 のような微小欠陥が連続して発達する。写真 2・6 には、石英粒子の分離の際につけられたとみられる縞状の痕跡がみえる。長石粒子のそれがへき開 方向に現われているのにくらべて、石英はいろいろの方向に縞模様がみられる。

写真 2・7、2・8 は風化の進んだ長石および石英粒子を低倍率で示している。長石はぼろぼろに変質しているが、石英はクラックが発達しても、長石ほど粉々になることはない。そして、石英のクラックは長石のものにくらべて明瞭なものが多い。

これらの写真から判断して、長石粒子の分解は粒子のへき開性に伴う欠陥から行われ、風化とともに粘土化していく。一方、石英粒子の崩壊は潜在的なクラックから生じ、さらにそのクラックの発達により進行していくものと考えられる。

2.3 種々の風化特性の判定法

2.3.1 風化形式の判定

風化の形式、厚さ、分布および不均質さの判定には、現地におけるおもに露頭の観察が重要である。とくに断層破砕帯の調査は、地形図や航空写真によってある程度推定できるが、実際には現位置の露頭観察が行われる。

マサ土の風化断面は、模式的に図 2・1、表 2・1 のように表わされることが多い。³⁾ このうち、表土層の厚さを簡単に測定する方法として、田中⁴⁾は鉄筋貫入法を提案している。

また、風化花崗岩の破断面を観察して、風化の形式を判定することができるが、この詳細については、2.4において述べる。

表2・1 マサ土層断面の区分³⁾

区 分		特 徴	マ サ 土 ↓
表層	① 表 土 層	細粒であり、植物の根が伸びている範囲で、一般にかっ色から黒かっ色。材料は外来性であって母岩の組織は残さない。いわゆる土壌の部分である。	
下層	② 風 化 土 砂	母岩の組織は存在するが、結晶とくに長石が著しく変質して粘土、シルトになっている。かっ色あるいは母岩の色に近い場合もある。節理面は風化産物が充填されているので、崩壊は必ずしも節理面によらない。	
	③ 軟 岩	未風化の岩塊が存在しているが、節理面は風化しているので節理面から分離して崩壊する。	
基層	④ 基 盤 岩	節理面はあっても変質の程度は少なく、鉱物の変質は少ない。	

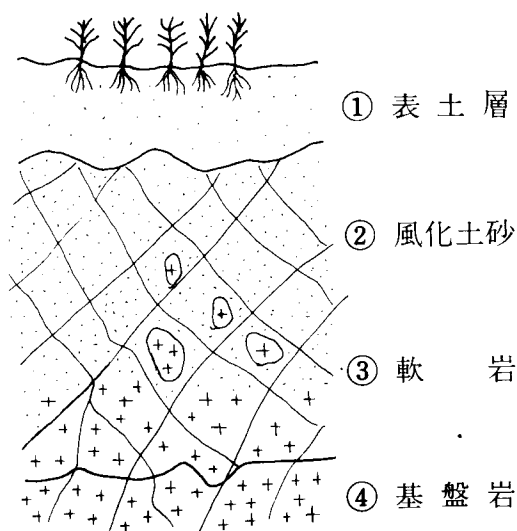


図2・1 マサ土層の断面³⁾

2.3.2 風化度の判定

(1) 現位置での判定

風化層の露頭は複雑なことが多いが、風化の程度は土粒子結晶の変質の程度や結晶間の結合力の差となって現われる。とくに長石粒子は風化とともに結

合力が低下するので、指ですりつぶしてみても粉碎しうるかどうか判定する。簡単にシルトまでつぶしうる程度であれば、かなり風化の進んだマサ土である。また、現場でかたさを判定する簡単な方法として、ハンマーの打撃反応を調べることもある。^{5) 6)}

土質工学会⁷⁾では、以上の観察状況や、ボーリングコアの状況、シュミットハンマー反発度、土壤硬度計貫入度および弾性波速度などを参考にして、表 2・1 よりさらに詳しい風化分類を行っている。

地山における弾性波速度は、風化度の判定のみならず広く用いられているものである。松尾ら⁸⁾は P 波速度が間隙率とかなり良い相関があり、風化度判定の有効な手がかりとなることを明らかにしている。中井^{9), 10)} は、神戸市が行った須磨地区の大堀削工事における花崗岩の深層風化の状況を弾性波速度を用いて明らかにし、とくに、岩石の掘削性（リップビリティー）と弾性波速度の関係を示している。また、Iliew¹¹⁾は、未風化岩の弾性波速度を v_0 、風化岩のそれを v_w として、 $K = (v_0 - v_w) / v_0$ で風化度を表わすことを提案している。

標準貫入試験などの各種貫入試験によっても風化程度を表わすことができる。竹中ら¹²⁾は、丹後地方のマサ土地盤のボーリング結果から、花崗岩の風化度と N 値の関係を調べた。ハンマー打撃により個々の粒子に分解できるようなマサ土では $N = 300$ ぐらいであり、ブロックとしては取り出すことができず粘着性のない粗砂や礫の集合体に分解するようなマサ土では $N = 50 \sim 100$ となる。松浦ら¹³⁾は広島地方のマサ土地帯における風化程度を N 値とスウェーデン貫入試験および単位体積重量で表わしている。西田ら¹⁴⁾は、大阪府河内長野市にて行ったボーリングにより、深さ別の N 値および採取した試料の強熱減量、比表面積を測定し、それぞれの対応関係を求めている。

これらの測定例を総合して考えてみると、N 値によりマサ土地盤の風化度をつぎのように分けることができる。¹⁵⁾

- 1) 基岩 - $N > 300$: 岩の結合を十分もっている。
- 2) 下層 - $300 > N > 50 (100)$: 粒子の固結状態は強固であるが、比表面積に少しの変化がある。粒子の変質はほとんどみられない。

3) 中間層－50(100)＞N＞20：岩の結合状態がゆるみ，地表に向けて細粒化が激しく，粒子の変質も著しい。

4) 上層－20＞N：雨水や地下水，炭酸ガス等による粒子の粘土化が顕著である。

また，マサ土のがいすい堆積物や埋立地盤のN値は10以下である。¹⁶⁾

一方，マサ土のような砂質地盤におけるサウンディングでは，一般に大きな貫入エネルギーが必要であり，そのため大がかりな設備が必要となる。また，風化の程度により，岩に近い堅いものから表土層の柔らかいものまで広範囲に変化する地盤には，地盤の堅さに応じて貫入エネルギーを大幅に調節しうる方法として，コンクリートのびょう打ち銃を用いる方法が適用されている。松尾ら⁸⁾は比叡山の切取斜面においてこの方法で調査した結果を，三つの風化段階に分類している。

(2) 室内での判定

乱した状態の土粒子の変質度に着目し，とくに風化しやすい長石粒子の変質度を指標とする方法がある。松尾ら¹⁷⁾は長石の比重を重液で測定することを試み，風化土の透水性，せん断強度，締固め特性などとの関係を明らかにしている。

土粒子のみかけ比重は，水の浸入が可能な土粒子中の空隙を土粒子の体積の一部とみなしたときの単位体積重量であって，つぎのように表わす。

$$Ga = \frac{Ws}{\left(\frac{Wo - Ws}{\gamma_w} + \frac{Ws}{\gamma_s}\right) \gamma_w} \quad (2.1)$$

ここに，Ws：土粒子の乾燥重量，Wo：表乾状態の土粒子の重量， γ_s ：土粒子実質部分の単位体積重量， γ_w ：水の単位体積重量である。松尾ら¹⁸⁾は，このみかけ比重がマサ土の長石比重，有色鉍物量と関係があり，マサ土の風化度を示す実用的な方法であるとしている。

粒子の空隙に着目したものとして，Hamrol¹⁹⁾は吸水量で岩石の風化度を表現することを提案し，風化度として，

$$i_1 = \frac{W_{\text{sat}} - W_s}{W_s} \times 100 \quad (2.2)$$

を提案している。ここに、 W_s ：試料の乾燥重量、 W_{sat} ：飽和重量である。渋谷²⁰⁾は同様な考え方で、孔隙率により、岩石の風化度を表示している。孔隙率とは、

$$P_0 = \frac{V - V_{tg}}{V} \times 100 \quad (2.3)$$

ここに、 V ：岩片の容積、 V_{tg} ：鉱物粒子の容積である。

風化花崗岩の単位体積重量，吸水率，引張強度の関係は後述する（2.4 参照）。

化学的な風化度の判定法として，強熱減量，pH，フッ酸腐食率，X線回折強度，化学成分などの方法がある。

強熱減量は、110℃で乾燥した試料を800～1000℃に強熱したときの重量減量を示すもので、主として結晶水を含んだ粘土分の多少を判定するものである。道路公団をはじめ、最近マサ土の風化度の指標として注目されており、^{21), 22)}最適含水比とかなり明確な関係をもっていることが明らかにされている。

土粒子の粉碎物の懸濁液の pH は化学的風化度の指標である。¹⁷⁾ pH は溶出イオン量と関係があり、風化の進んでいるものほど残存しているアルカリイオンが少ないので、懸濁液の pH は小さくなる。

一方、柏木²³⁾は雲母の変質の程度を風化の尺度とし、X線の底面反射強度で風化度を区分している。

さらに、マサ土の化学成分によって風化度を判定する方法が地質学の分野で行われている。比較的溶脱しにくい Al_2O_3 に対する $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ の比をとって表わすものである。²⁴⁾ また、けい酸、三二酸化物（ Al_2O_3 など）およびアルカリ金属とアルカリ土類金属の合計の三成分により三角座標で表わすこともある。

花崗岩の風化土内の長石の変質を直接測定する方法として、Lumb²⁵⁾はつぎのような風化度を提案している。

$$X_d = \frac{N_q - N_{q0}}{1 - N_{q0}} \quad (2.4)$$

ここに、 N_q ：風化物中の（石英）／（石英＋長石）

N_{q0} ：母岩中の（石英）／（石英＋長石）である。

マサ土は風化の程度、母岩の組成により色調が異なる。したがって、土の色も風化度の指標になりうる。これについては後述する（2.5参照）。

マサ土の風化度の判定法としては種々のものがあり、その主なものを本節にまとめたが、おのおのの判定法にはおのずから適用限界があり、また、判定結果の利用目的によってもとるべき手法が異なる。図2・2はこれらの判定法の有効適用範囲と利用目的について、風化度を5段階に分けてまとめたものである。²⁶⁾

物理的	不攪乱	方 法		風 化 度				備 考
				硬 岩 ——— 軟 岩 ——— 風化土				
		風化度の基準 弾性波速度(km/sec)		未風化—弱風化—中風化—強風化—烈風化				
			4.0	3.0	2.0	1.0		
攪乱	現地試験	弾性波試験	—————→				力学的性質との関連、 岩盤区分、掘削の難易 力学的性質、土工量 〃 ドライビット の場合は軟岩にも可能	
		現場密度試験	—————→					
		貫入試験	—————→					
	室内試験	密度・空隙率	←—————				力学的性質 〃 〃 力学的性質、土質安定	
		吸水率	←—————					
		岩石組織 間隙比、 長石の溶脱度	—————→					
土結晶 子品	長石の比重	—————→				力学的性質、土質安定 〃		
	雲母の結晶度	—————→						
攪乱	土粒子全体	みかけ比重	—————→				力学的性質、締固め度 粗粒な風化土のみ 力学的性質、CBRなど 〃	
		強熱減量	—————→					
		自然含水比	—————→					
化学的・鉱物学的	化学的	粉碎土粒子の懸濁液のpH	←—————				土質安定、力学性 〃 〃	
		化学成分 薬品腐食試験	—————→					
	鉱物的	鉱物の種類、 量と組合わせ	—————→				〃	
地質的	現地観察	岩石の変質度の観察	—————→				主観が入るが、便利である	

図2・2 岩石の風化度判定法と有効範囲

2.4 風化花崗岩の破断面観察に基づく風化形式の判定およびその表示方法²⁷⁾

2.4.1 風化の量的表示と引張り強度

前節に述べたように、従来の風化の表示方法では、風化形式の判定は現位置の露頭観察だけである。そこで本節ではこの風化形式の判定を試みることにする。それには 2.1 で述べたように鉱物粒子の変質、弱体化の相違が手がかりとなる。この意味で風化岩の引張り試験が重要となる。従来、土の引張り強度は強度特性の中では重要視されなかったが、簡単な方法で実施できれば、斜面の安定解析などには欠かせないものとなるであろう。ここでは、比叡山および六甲山から採取した風化花崗岩について引張り試験を行い、風化度と強度の関係を明らかにする。

(1) 試料

六甲試料は、山陽新幹線神戸トンネルの東坑口から順次採取したもので、坑口から約 1 km (A 試料)、約 500 m (B 試料)、約 250 m (C 試料) と、坑口に近いほど長石の変質がみられ、風化が進んでいると考えられる。比叡試料は土砂採取場から採取したもので、A 試料は土かぶり厚約 40 m の位置の岩石で、比較的新鮮であり、B および C 試料は地表面に近い部分のもので、雲母の周辺が酸化鉄で着色されている。

図 2.1 に示した風化層模式図を用いると、これらの試料はすべて軟岩に属する。六甲、比叡試料とも、A 試料は基盤岩に近い性質を有し、B、C 試料の順に風化土砂に近いものである。

(2) 風化度の測定

前節で述べた種々の風化度の表示方法のうち、単位体積重量、吸水率および反発係数の三つを測定した。

まず、引張り試験に使用する供試体を 48 時間水浸後、表面水をふきとったいわゆる表面乾燥内部飽和の状態の重量 (W_0)、およびその水中重量 (W') を求め、さらに 24 時間炉乾燥した後の重量 (W_s) より、単位体積重量と吸水率を次式で求めた。²⁸⁾

$$\text{単位体積重量}(\gamma) = \frac{W_s}{W_0 - W'} \gamma_w \quad (2.5)$$

(γ_w は水の単位体積重量)

$$\text{吸水率} (n_w) = \frac{W_0 - W_s}{W_s} \times 100 \quad (2.6)$$

図 2・3 は単位体積重量と吸水率の関係を示した。単位体積重量は 2.60 以下で、吸水率と直線関係にある。風化が進むにつれて、単位体積重量が減少し、吸水率が増大する。

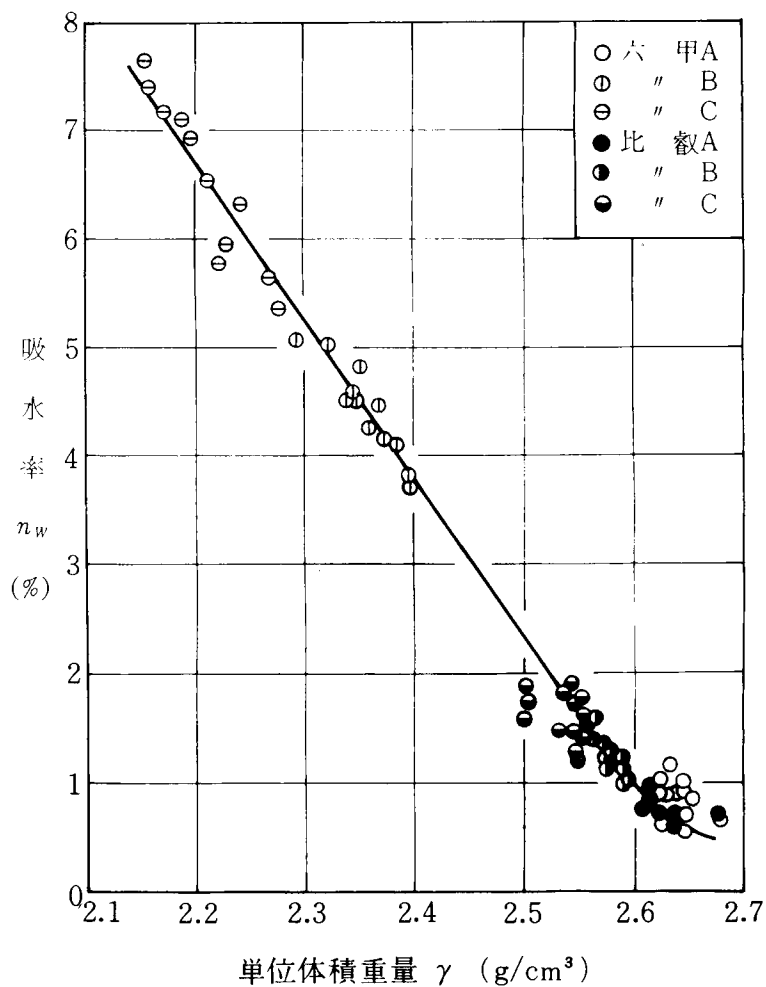


図 2・3 単位体積重量と吸水率の関係

一方、反発係数は、長さ 30 cm の糸に約 14 g の鋼球を付け振子とし、鉛直と 30° をなす点から、支持鉄板に固定した試料面に衝突させ、はね返ってくる角度(θ)を読みとり、次式で求めた。²⁹⁾

$$\text{反発係数}(e) = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos 30^\circ}} = 2.732 \sqrt{1 - \cos \theta} \quad (2.7)$$

図 2.4、図 2.5 は反発係数と、単位体積重量および吸水率の関係を表わしている。六甲試料は、単位体積重量、吸水率とも大きな変化を示しているが、反発係数の変化は少ない。一方、比叡試料については逆に反発係数の変化幅が大きく、単位体積重量、吸水率はあまり変化していない。これは両試料が風化過程において受けた履歴の異なることに起因すると考えるが、詳しくは破壊断面の観察結果に基づいて述べることにする。

単位体積重量と吸水率は、同様な傾向を示すものであるから、ここでは以下の風化度の指標としては、単位体積重量と反発係数を用いる。

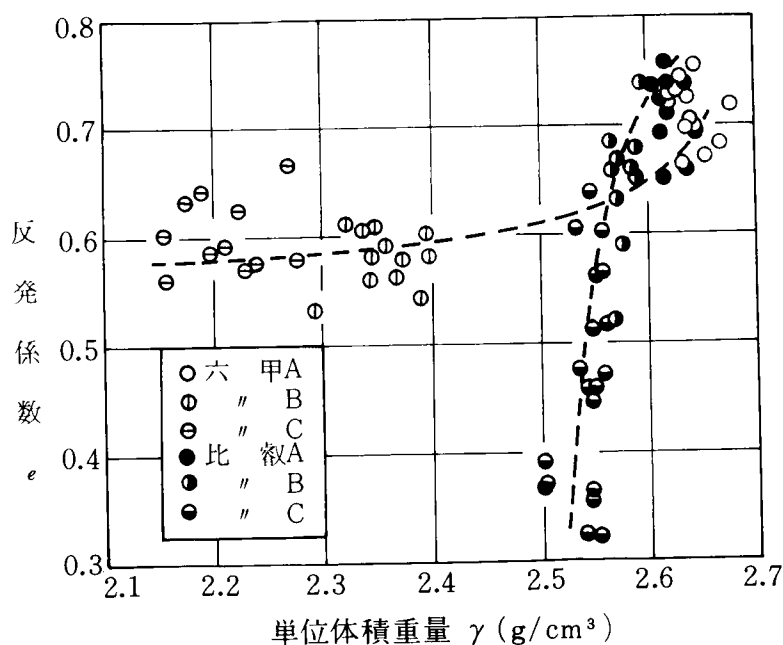


図 2.4 反発係数と単位体積重量の関係

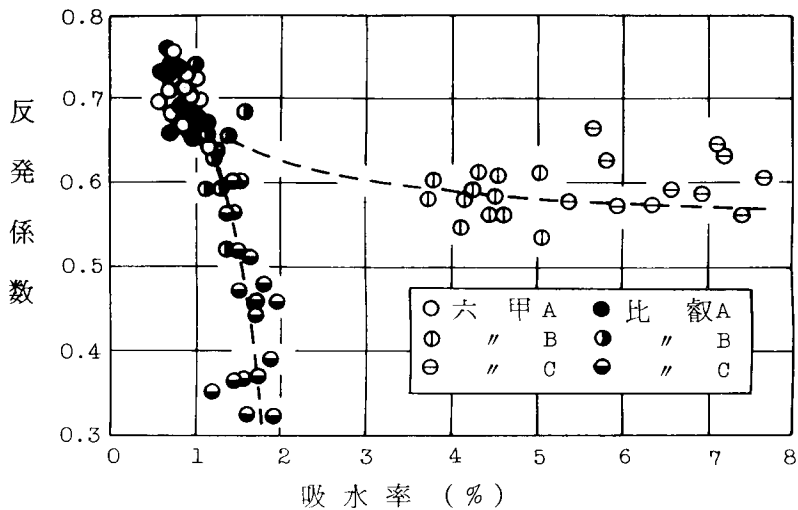


図 2・5 反発係数と吸水率の関係

(3) 風化度と引張り強度

引張り強度試験は、単純引張り試験と圧裂試験を行った。まず単純引張り試験は、約 $10 \times 10 \times 30 \text{ mm}$ の大きさに成形した供試体を用いた。供試体の両側面に接着剤でナットを接着し、ボルトを取り付け、チェーンの先につけたクリップでボルトをはさむ。荷重はマリオットびんから流出する水をチェーンの端につけた容器で受ける応力制御式である（図 2・6）。破壊強度は、供試体破断時の容器と水の重量を計量し、供試体断面積で除して求めた。

つぎに、引張り荷重載荷時のひずみの変化を知るために圧裂試験³⁰⁾を行った。試料は直径約 32 mm 、高さ約 30 mm の円柱供試体で、ひずみの変化は、ひずみゲージと静ひずみ計で読みとった。

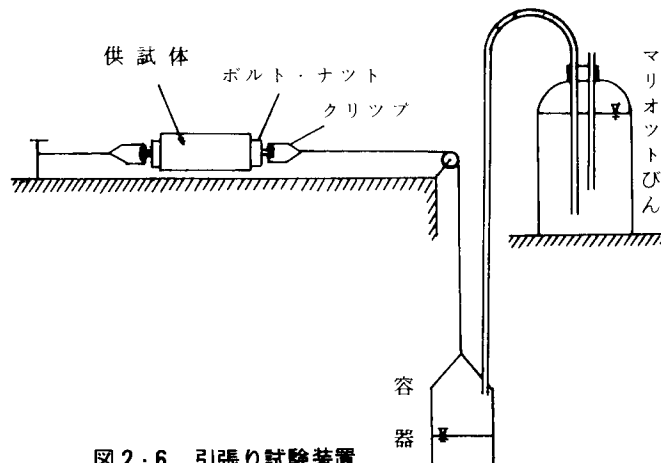


図 2・6 引張り試験装置

図2・7は、引張り強度と単位体積重量の関係を示したものである。図2・8は引張り強度と反発係数の関係を表わしている。風化が進行して、単位体積重量、反発係数が減少するにつれて、引張り強度は低下している。松尾・西田³¹⁾は、長石粒子の圧砕強度と風化度の関係を発表しているが、それと同様の関係にある。したがって、引張り強度も風化の指標と考えられる。しかも、六甲試料、比叡試料両者について、同程度の変化幅を有し、前述の単位体積重量、吸水率や反発係数で表示した風化度を総合した指標である。

図2・9は、比叡試料の応力-ひずみ曲線を示している。風化の進んでいない

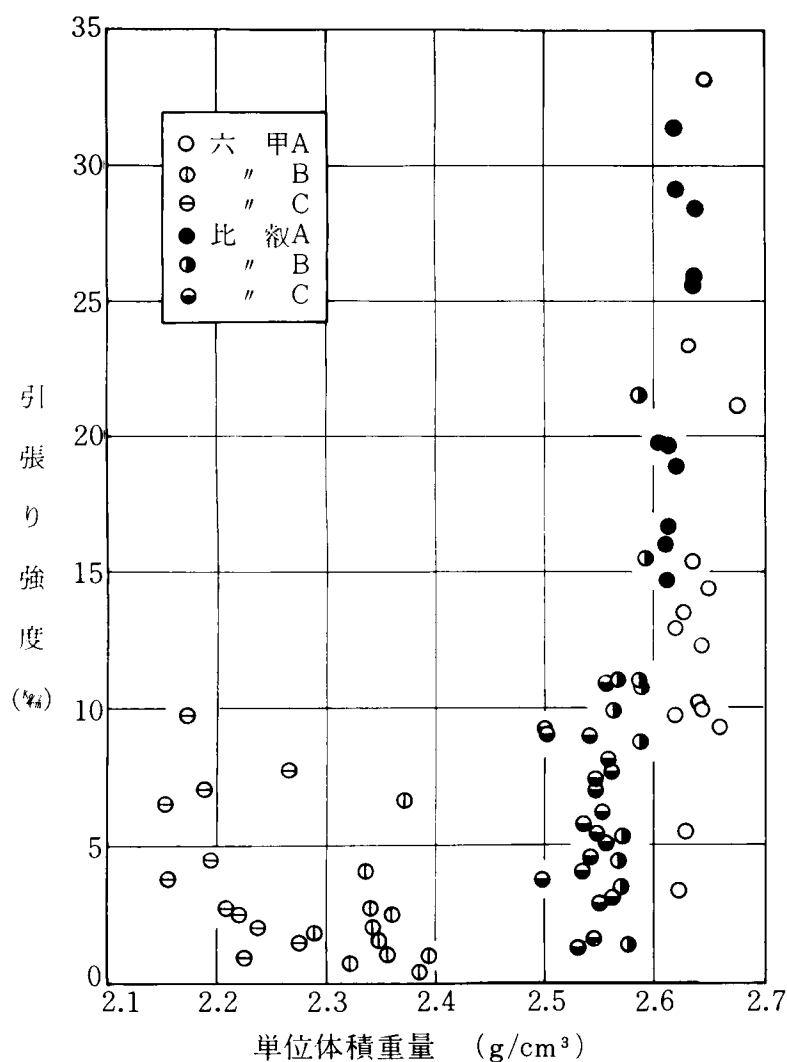


図2・7 単位体積重量と引張り強度の関係

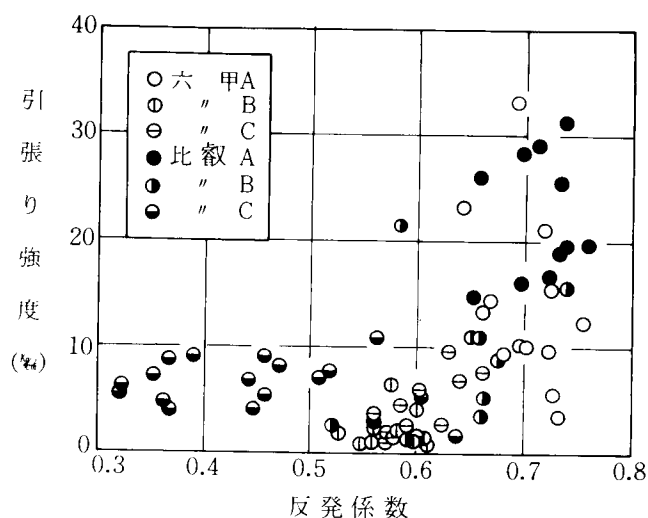


図 2・8 反発係数と引張り強度の関係

試料Aは、応力の増加とともにひずみが直線的に増加し、ひずみの小さいところで破壊する。弾性的な性質を示し、弾性係数は $5 \sim 10 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ である。風化が進むにつれて、ひずみの進行は顕著になり、試料Bでは、ほぼ 10^{-3} のひずみで破壊している。試料Cになるとひずみは応力の小さいうちから急激に進行し、破壊時には 10^{-2} にも達することがある。弾性的な性質はほとんど失われている。

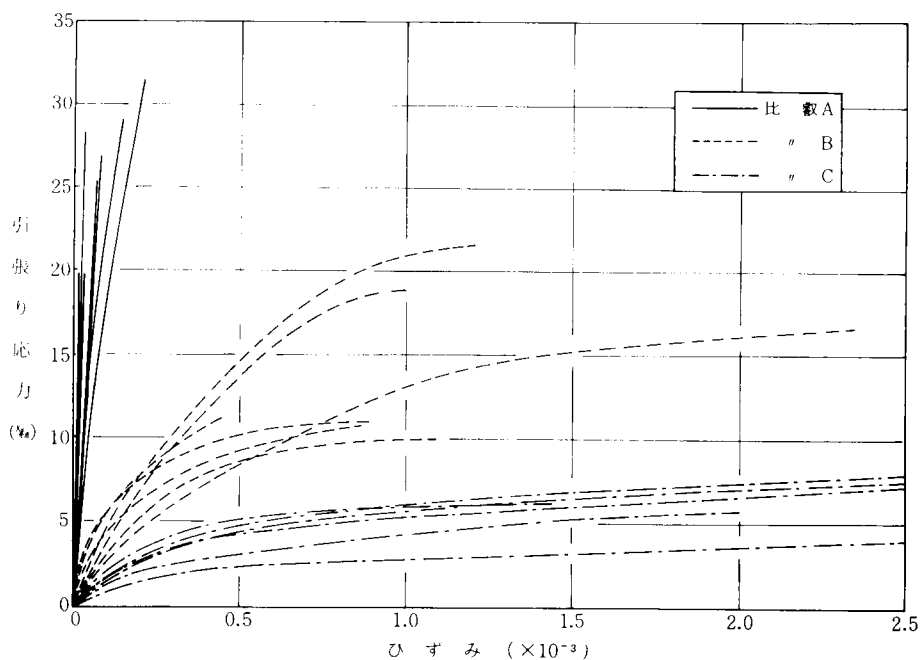


図 2・9 応力—ひずみ曲線

2.4.2 破断面観察に基づく風化形式の判定

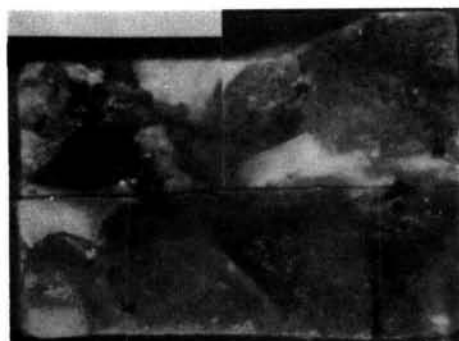
(1) 破断面の観察

前項で行った引張り試験により得られた破壊断面を顕微鏡で観察した。まず、試料をフッ化水素 10 % 溶液に約 1 分間浸し、水洗後亜硝酸コバルチナトリウム 2 % 溶液に約 2 分間浸し、再び水洗して乾燥する。この操作により、長石は白色に着色され、やや透明で灰色の石英と見分けやすくなる。³²⁾

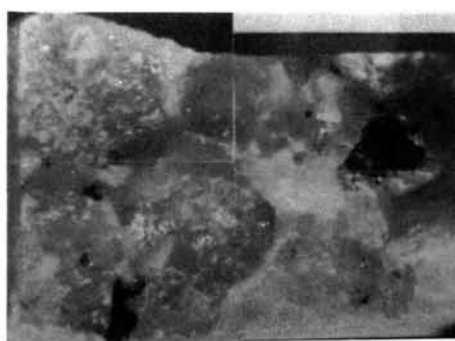
つぎに、1 mm 間隔の小穴をうがった透明フィルムを破壊断面上にのせ、反射型顕微鏡で観察しながら、破断面をスケッチする。破断面両面のスケッチを重ねて、粒内破壊（石英－石英，長石－長石，雲母－雲母）と、粒界破壊（石英－長石，長石－雲母，雲母－石英）の 6 成分の面積比を求める。

肉眼で一個の粒子とみていたものは、実は粒子群であることが多く、石英粒子，長石粒子とみえるものは石英粒子群，長石粒子群である。したがって、たとえば石英－石英の破壊は、石英粒子内破壊および石英粒子間破壊の両者を含み、これを石英粒内破壊と呼ぶ。一方，石英－長石の破壊のように，異種鉱物粒子間の破壊を粒界破壊と呼ぶ。風化作用においては，雲母は長石と同じような性質を持つこと，および雲母の割合が少ないことから，ここでは雲母を長石に含めて考察する。したがって，破断面の形態は，石英粒内破壊，長石粒内破壊および石英－長石粒界破壊の三つである。

写真 2・9 は破断面の顕微鏡写真である。図 2・10 にはスケッチによる石英，長石，雲母の分布を示した。図 2・10(a)，(b) を重ね合わせると，図 2・11 のよう



(a)



(b)

写真 2・9 破断面の顕微鏡写真

に、石英粒内破壊、長石粒内破壊および粒界破壊の区分が描ける。これらの面積を測定して、その比率を求めた。

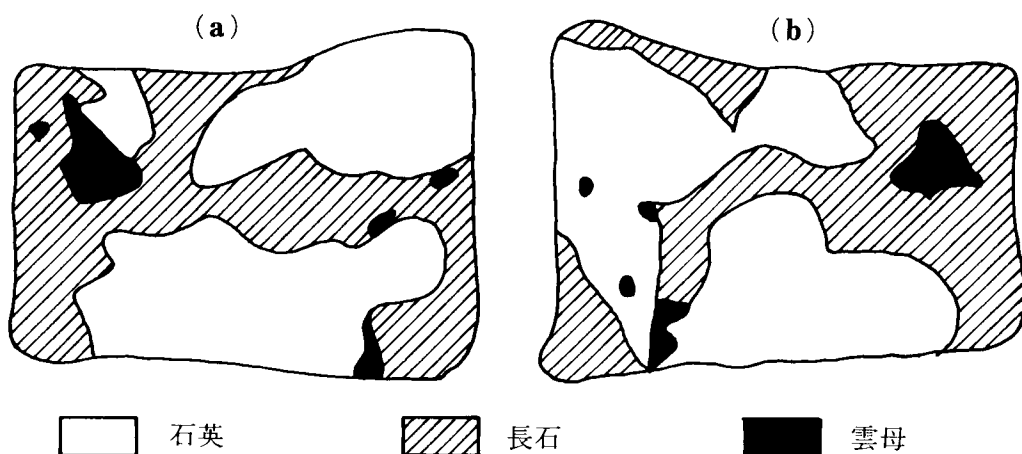


図2・10 破断面の観察スケッチ

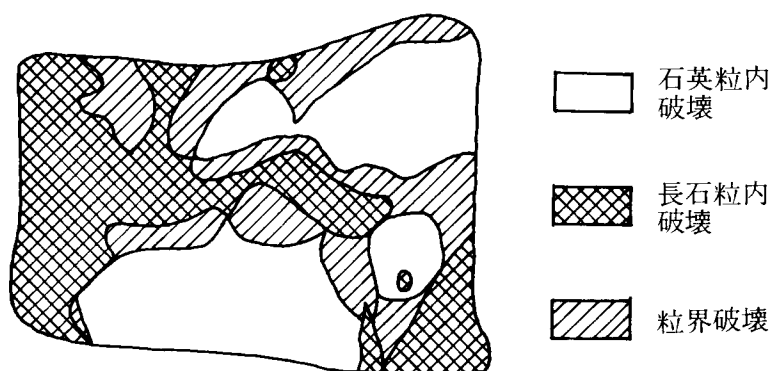
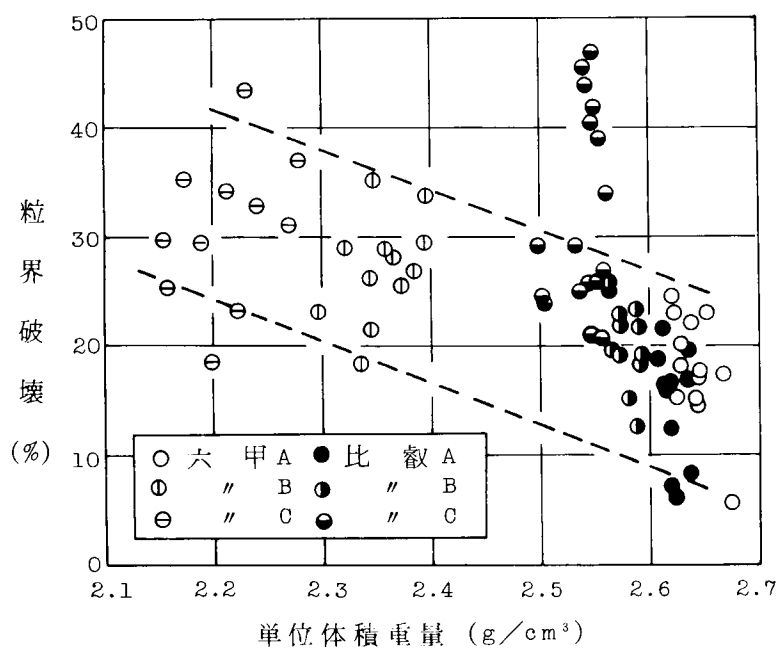


図2・11 破断面スケッチの重ね合わせ

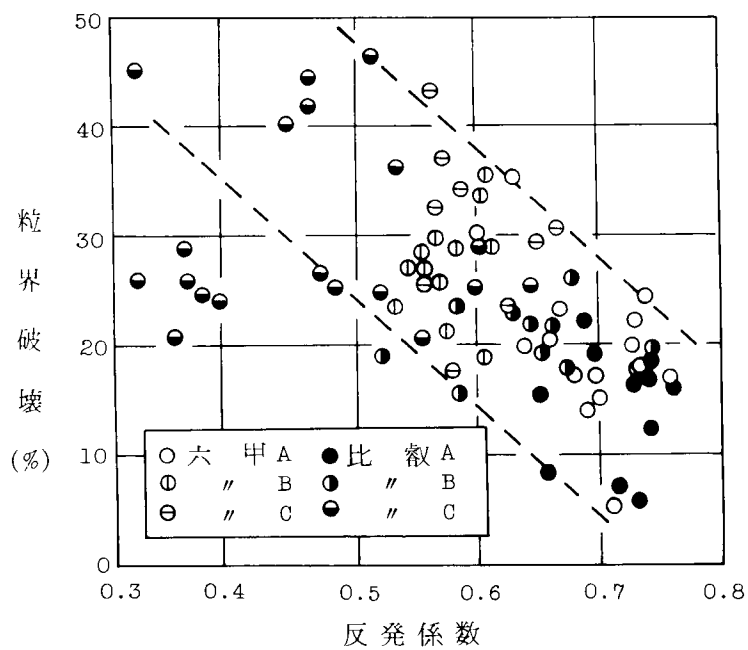
(2) 風化と破壊形態

図2・12(a), (b)は、風化度の指標として単位体積重量と反発係数を用い、これらと粒界破壊との関係を示したものである。風化の進行に伴い粒界破壊が増大することがわかる。すなわち、風化作用により石英—長石の粒子間にクラックが生じ、結合力が減少して、弱体化した粒子間に破壊が起る。最弱リンク説³³⁾、あるいは選択破壊³⁴⁾といわれるものである。

図2・13(a), (b)は、粒界破壊と粒内破壊との関係である。粒界破壊の増大に

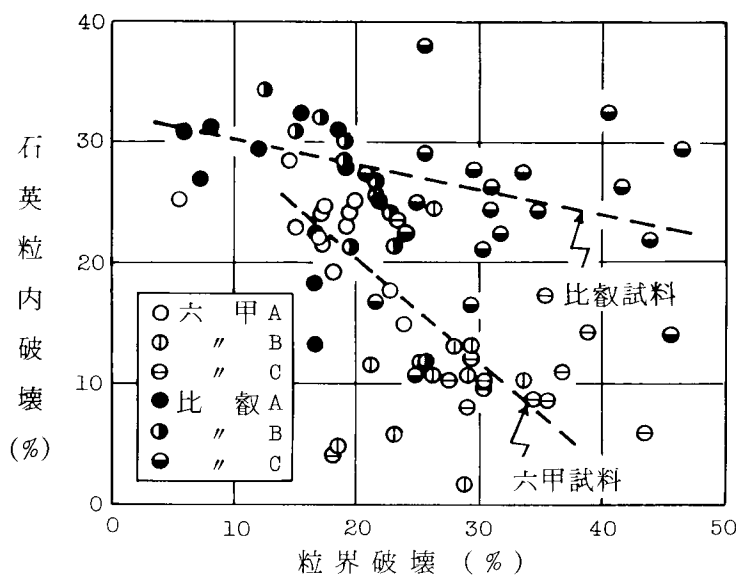


(a) 単位体積重量と粒界破壊

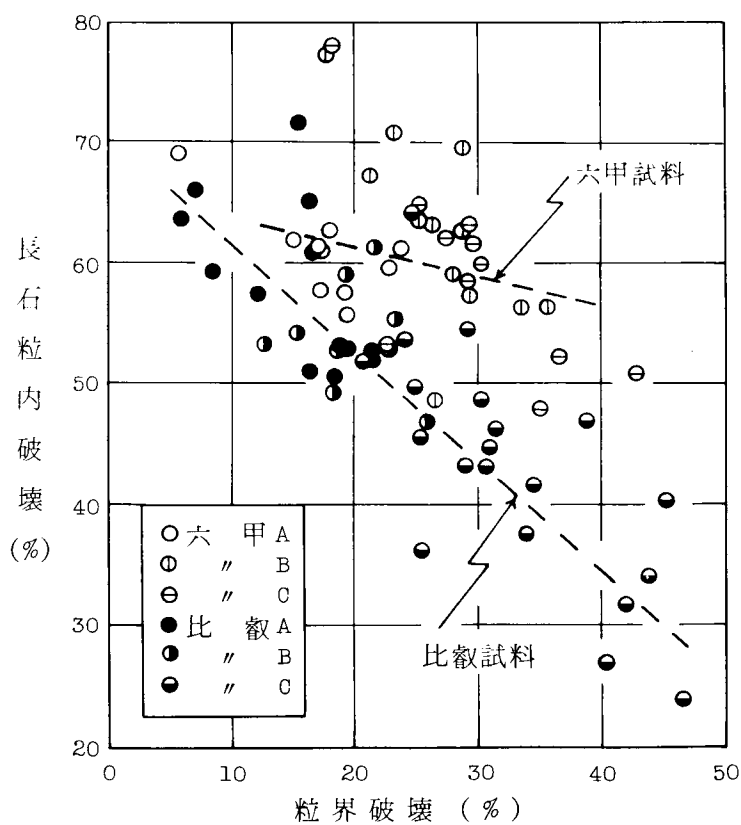


(b) 反発係数と粒界破壊

図 2・12 風化度と粒界破壊の関係



(a) 石英粒内破壊と粒界破壊



(b) 長石粒内破壊と粒界破壊

図 2・13 粒界破壊と粒内破壊の関係

伴い、石英、長石とも粒内破壊が減少していることは、風化作用がまず石英－長石の粒子間を弱体化させることを示すものである。

一方、粒内破壊の減少の傾向は六甲試料、比叡試料で異なっている。図2・14 (a), (b)は、単位体積重量と粒内破壊の関係を示している。図2・15(a), (b)は、反発係数と粒内破壊の関係である。これらの図によると、風化の進行に伴い、比叡試料は長石粒内破壊が大きく減少し、石英粒内破壊はそれほど変化しない。一方、六甲試料では逆に石英粒内破壊の減少が著しい。粒内破壊の減少は、粒子が強固なため、破壊線が粒子内部を通らず、これを避けていることを意味する。すなわち、風化により粒子が劣化していないことを示すものである。

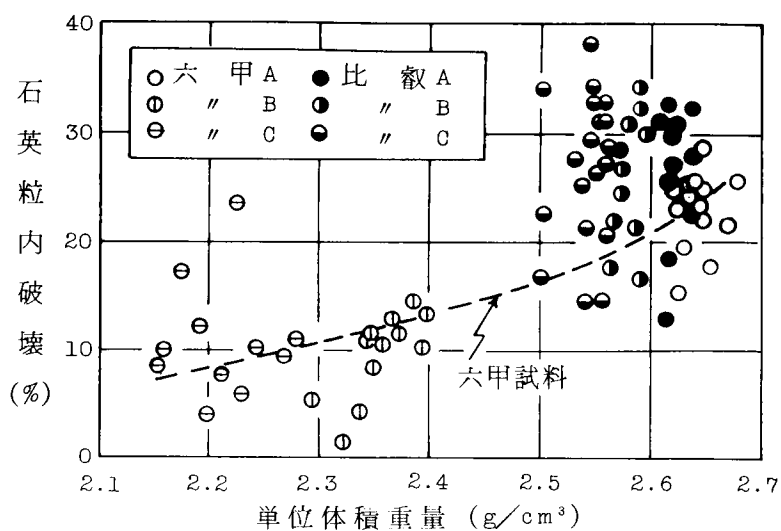
この意味から考察すると、比叡試料の長石は風化作用によりほとんど変質していないが、石英粒子に風化作用の影響がみられる。また、六甲試料では長石粒子が変質し、石英粒子は強固であることがわかる。長石粒子は化学的な作用により変質するが、石英粒子は化学的に安定な鉱物である。一方、早瀬³⁵⁾の研究によると、熱、圧力などの物理的な作用は石英粒子に影響を与える。以上のことより、比叡試料はおもに物理的風化を受けており、六甲試料は化学的な風化が優勢である。

このことが六甲山、比叡山全体の花崗岩の風化形式を意味するのではなく、六甲山にも物理的風化の優勢なものがあるし、比叡山にも化学的風化の進んだものが存在する。

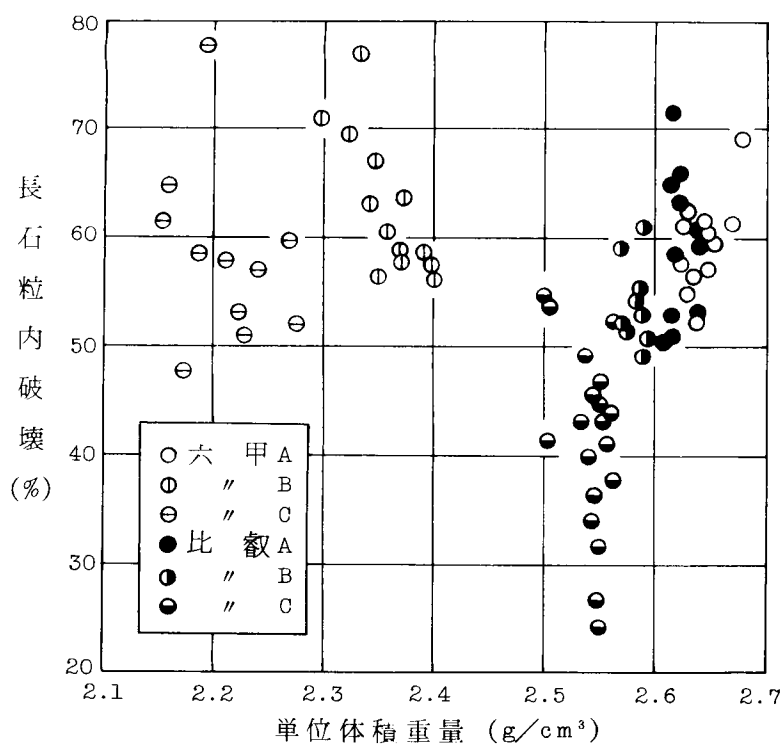
風化の指標として用いた単位体積重量および反発係数を上記の風化形式から考えてみると、単位体積重量は六甲試料の風化度をよく表わし、反発係数が比叡試料の風化度を表示している。すなわち、化学的な風化は単位体積重量や吸水率で示すことができ、物理的な風化は反発係数が適当である。この両指標は、ともに粒子間および粒子内のクラックに関係する量であるが、前者は外部と連絡したクラックとだけ関係するのにくらべ、後者は粒子内部に孤立した欠陥の影響も加味できるところに、上記の相違が生じるのであろう。

(3) 破壊形態からみた花崗岩のマサ土化

図2・16は、粒界破壊、石英粒内破壊、長石粒内破壊をまとめたものである。

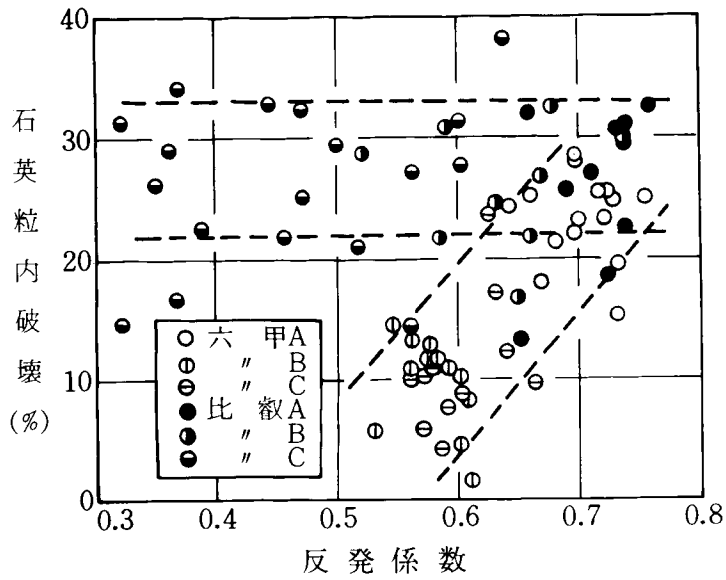


(a) 石英粒内破壊と単位体積重量

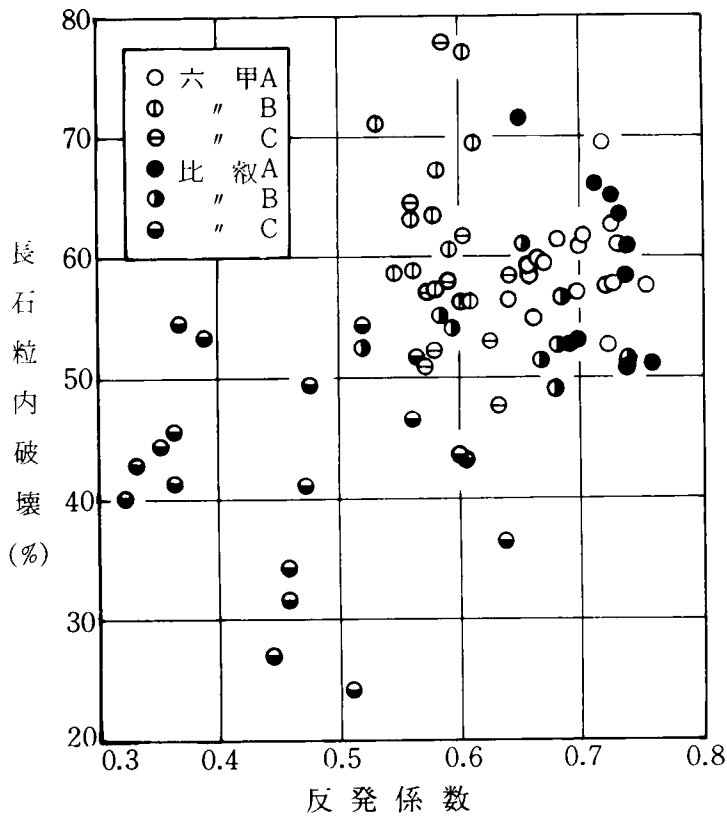


(b) 長石粒内破壊と単位体積重量

図2・14 単位体積重量と粒内破壊の関係



(a) 石英粒内破壊と反発係数



(b) 長石粒内破壊と反発係数

図 2・15 反発係数と粒内破壊の関係

風化の進行に伴い、粒界が弱体化し粒界破壊が増大することは前述のとおりである。この変化により岩石から個々の粒子へ分離して、いわゆるマサ土が生じる。ところが、物理的風化が優勢な比叡試料では石英内で破壊する割合が長石内より大きく、石英が細粒化していく。一方、化学的風化をおもに受けている六甲試料では、石英が細粒化することはあまりなく、長石粒子が変質して粘土化していく。

このように物理的風化から得られるマサ土と、化学的風化から得られるマサ土では、組成的に性質が異なると考えられる。一般には、物理的風化の進んだマサ土でも、長年月のうちに化学的変質作用を受けるし、化学的風化の優勢なマサ土も、物理的崩壊作用を受ける。しかし、物理的風化の進んだマサ土の石英はもろくなっており、従来石英が風化に対して強い抵抗力を持っているとされていたことも、考え直す必要があるだろう。

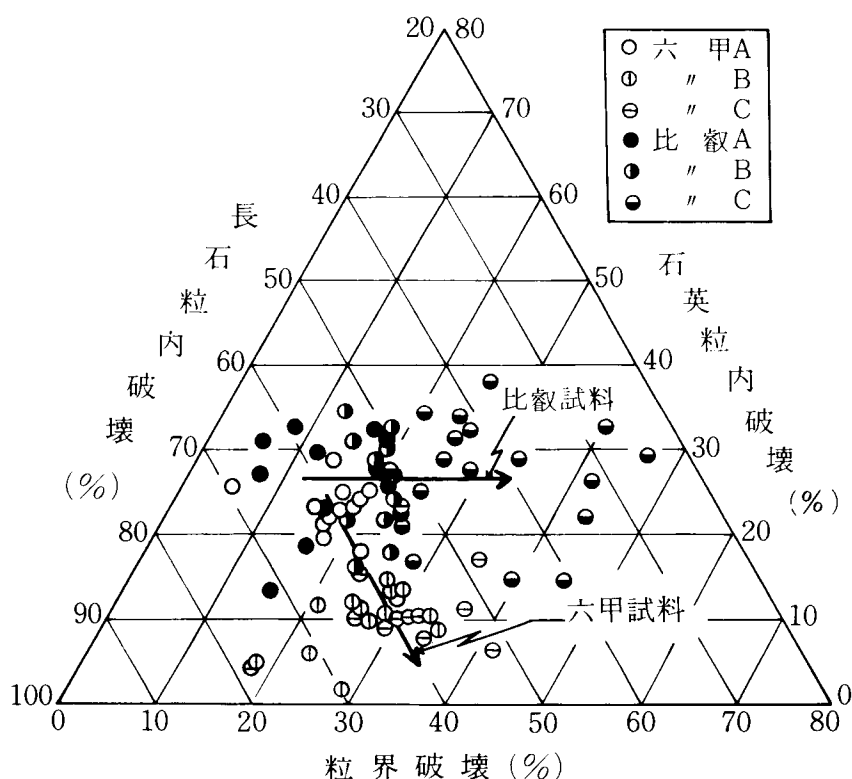


図2・16 風化に伴う破壊形態の変化

2.5 色調による風化度の判定³⁶⁾

2.5.1 色調の表示方法

色の表示方法にはつぎに示すような種類があって、主観的表示方法を順次科学的な客観的表示方法へと工夫され、現在に至っている。^{37), 38), 39)}

(1) 色名による表示方法

もっとも古くから用いられてきた方法で、色彩科学的知識なしに現在でも慣用されている。しかし、色名による表示は多分に主観的であり、意味上からも使用上からも不確定なものである。Bushnell⁴⁰⁾は多くの土試料を学生、研究者に与え、土に関する用語を調べたが、色の意識は人によって大きく違っていた。

(2) 波長による表示方法

色をスペクトル色と比較して、波長で表示しようとするものであるが、本来、スペクトル色はあざやかな色ばかりで、中間色がないため、スペクトル波長のみで正確な色の表示はできない。

(3) 三属性による表示方法

色の三属性すなわち色相、明度、彩度を同時に併記して表示手段とする。すなわち、三属性をそれぞれ視感的に等歩度の適当な数に分割し、その各歩度に数字や記号をつけて表示するものである。この方法は、標準色紙と試料の色を比較するもので、個人差があり、標準色自体の変質も考えられる。

(4) X Y Z系による表示方法

1931年、国際照明委員会(CIE)の決議に基づいた表色方法で、まったく物理的な測定からその表示値を決める。現在のもっとも精密な表色方法である。

X Y Z表色法は、三つの異なる互に一次独立の色刺激(X), (Y), (Z)を同時にあるいは交互に継続して目に入れると、三つの色とは違った色にみえ、この三つの色刺激の量を変化させると、かなり広範囲の色が表わされることに基づいている。そして、この三つの色刺激の加えられぐあいを数値で表わし、その数値を三連併記して表示する。三つの色刺激(X), (Y), (Z)はすべての色を

表示するときにその割合 X ， Y ， Z がすべて正になるように決められており、かつ (X) および (Z) は明度 0 のものを採用している。

いま、原色 (X) ， (Y) ， (Z) を X ， Y ， Z の割合で混合して、未知の色 (C) になったとすると、

$$C(C) = X(X) + Y(Y) + Z(Z) \quad (C = X + Y + Z) \quad (2.8)$$

で表わされる。ここで色の質だけを問題にするときは、その量的なものを切り離して、

$$(C) = x(X) + y(Y) + z(Z) \quad (2.9)$$

$$(x = X/C, \quad y = Y/C, \quad z = Z/C, \quad x + y + z = 1)$$

とする。すなわち、色の質を表示するには、 x ， y ， z のうち二つ x ， y を横軸および縦軸に持つ直角座標を用いる。これを色度図という。また、 (X) ， (Y) ， (Z) のうち、明度を有しているのは (Y) だけであるから、 Y により色の量的表示ができる。このように、 x ， y ， Y の三つの指標により、色を表わすことができる。

一方、色度図にスペクトル色をプロットすると、**図 2.17** のようになる。そして一般の色は、馬てい形のスペクトル軌跡の中にはいつてくる。白は $x = y = 1/3$ の点 W である。いま点 Q で表わされる色について考えてみる。 WQ を結び、スペクトル軌跡との交点を S とすると、この場合 S の波長は $480m\mu$ である。これを色 Q の主波長 (λ_m) という。また、 $p = QW/SW$ は純度と呼ばれ、0 から 1 までの値をとる。すなわち、白は $p = 0$ ，スペクトル色は $p = 1$ となる。だから x ， y の代りに λ_m および p を用いて色の質を表わすことも可能である。

2.5.2 試料および色の測定方法

(1) 試料

試料は比叡山より採取した 4 種類のマサ土である。**表 2.2** に試料の物理的性質を示す。ここで用いた 4 種のマサ土の母岩は黒雲母花崗岩で同系統のものである。

これらの試料から、 $420 \sim 74 \mu$ の粒子を取り出し、粒子表面の付着物を

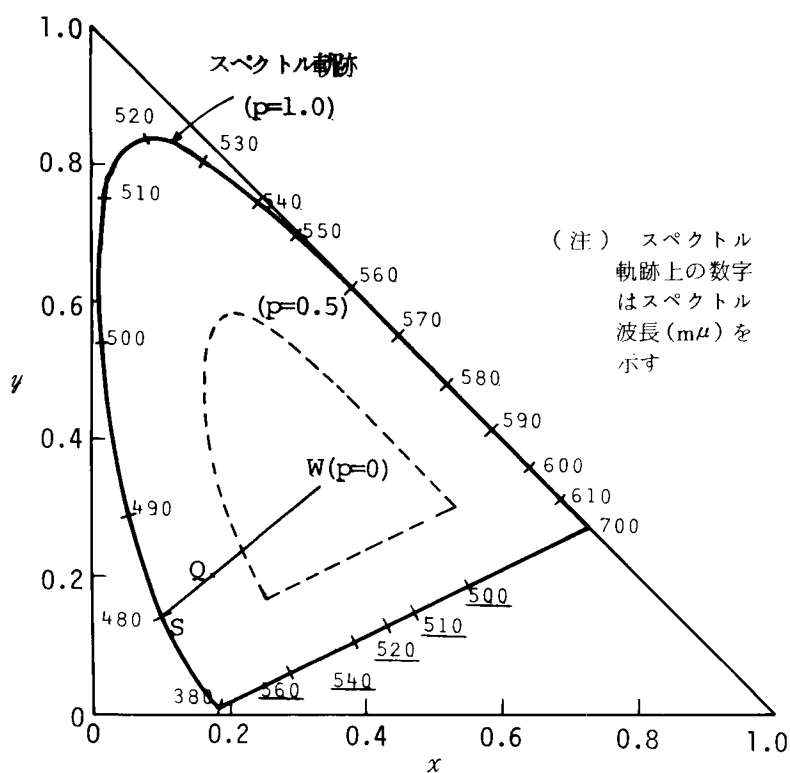


図2・17 色度図上のスペクトル軌跡³⁸⁾

除くため水洗し乾燥した。つぎに磁気分離機により、有色鉱物（主に黒雲母）とけい長鉱物（石英と長石）に分離した。色の測定には、有色鉱物量が0，10,20,30,50,70,100%になるように調整した試料を準備した。

表2・2 試料の物理的性質

試 料 名	A	B	C	D
土 粒 子 比 重	2.633	2.650	2.623	2.634
み か け 比 重	2.316	2.367	2.459	2.528
有 色 鉱 物 量 (%)	26.14	13.49	10.64	11.26
均 等 係 数	13.8	20.6	2.54	5.16
液 性 限 界 (%)	34.2	29.0	26.4	22.9
最 適 含 水 比 (%)	16.5	14.0	12.5	11.7
最大乾燥密度 (g / cm ³)	1.69	1.76	1.89	1.89

(2) 色の測定方法

色の測定は、試料を乳ばちで 74μ 以下に粉碎し、含水比 0 %で行った。

図2・18は自記色彩測定機で分光反射率を求めた一例であり、A試料の乾燥状態において、有色鉍物量を変化させたものである。

このような分光反射曲線から、 X 、 Y 、 Z を求める。使用した自記色彩測定機の標準光源Cの分光エネルギー分布 E_λ はCIEにより与えられているので、各波長について E_λ と試料の反射率 ρ_λ の積を求めると、目にはいる光の量が得られる。一方、三つの色刺激(X), (Y), (Z)をどのように混合すれば、単位量の各波長の光が得られるかが、測定と計算からわかっている。これはスペクトル三刺激値 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} と呼ばれ、図2・19に示すようである。この割合で各波長の $E_\lambda \cdot \rho_\lambda$ を X 、 Y 、 Z にふりわければよい。この関係を数式

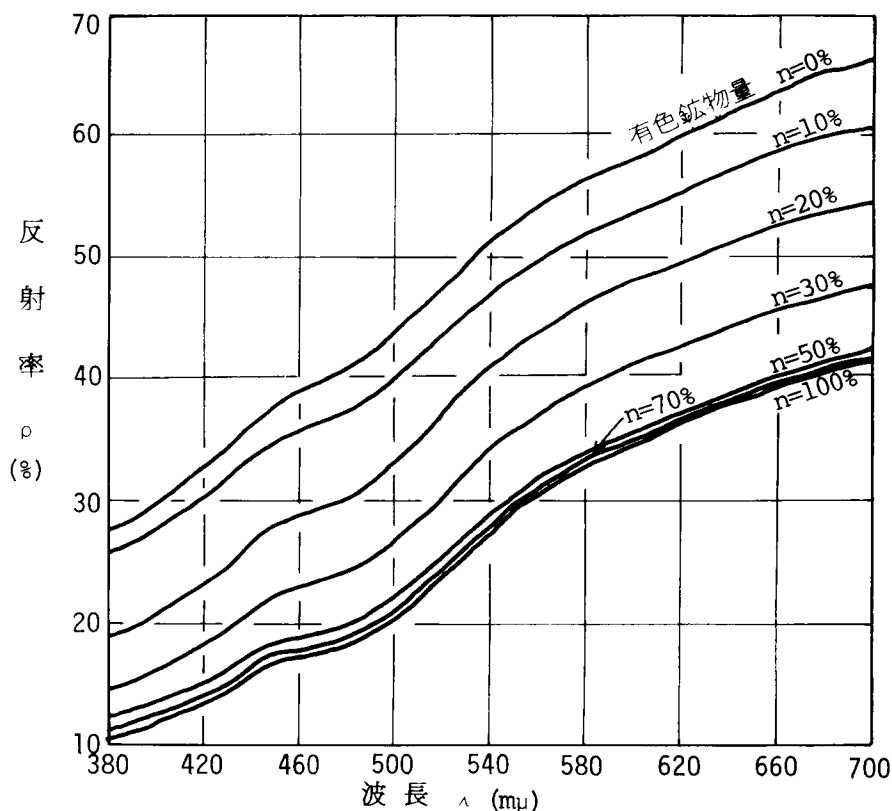


図2・18 反射率曲線(試料A)

で表わすと、つぎのようである。³⁸⁾

$$\left. \begin{aligned} X &= \int E_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda} \cdot \bar{x} \cdot d\lambda \\ Y &= \int E_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda} \cdot \bar{y} \cdot d\lambda \\ Z &= \int E_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda} \cdot \bar{z} \cdot d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 10)$$

分光分布曲線から、上式で X 、 Y 、 Z を簡単に求めるために、表色積分計算機を用いた。このようにして求めた X 、 Y 、 Z より、色度座標 x 、 y を求める。

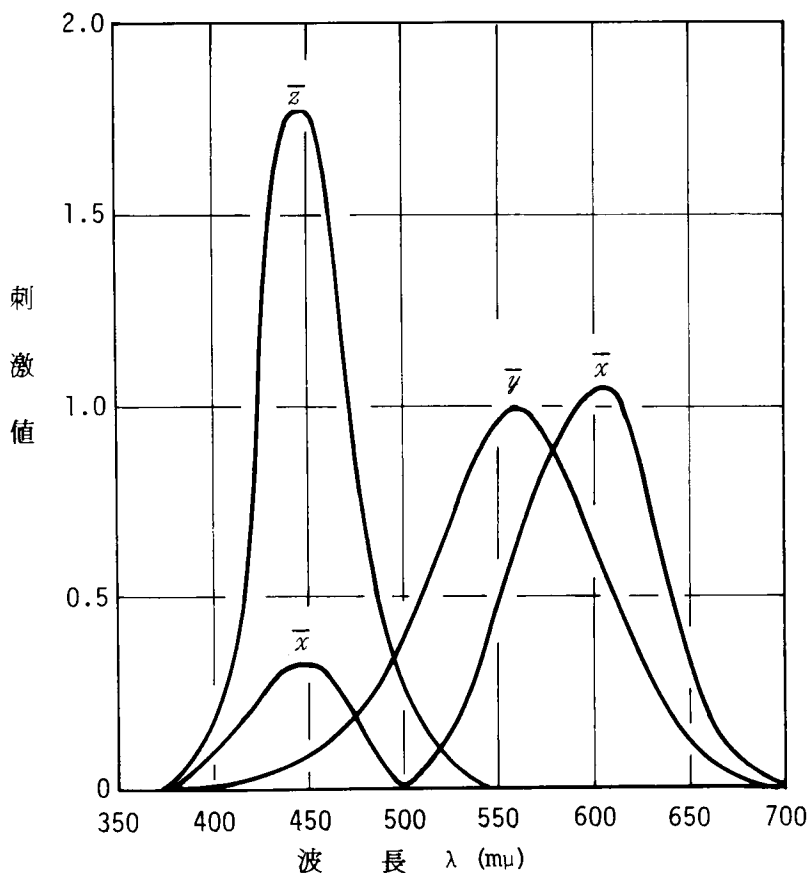


図 2・19 スペクトル三刺激値 ³⁸⁾

2.5.3 有色鉱物量と色調の関係

図 2・20 は、乾燥状態における有色鉱物量(m)と明度(Y)との関係である。有色鉱物量の増大に伴い明度が減少し、色は暗くなることがわかる。有色鉱物量 30 % までは、直線的に明度が減少するが、30 % 以上になると減少割合が小さくなり、50 % 以上ではほとんど変化しない。実際のマサ土の有色鉱物量はだい

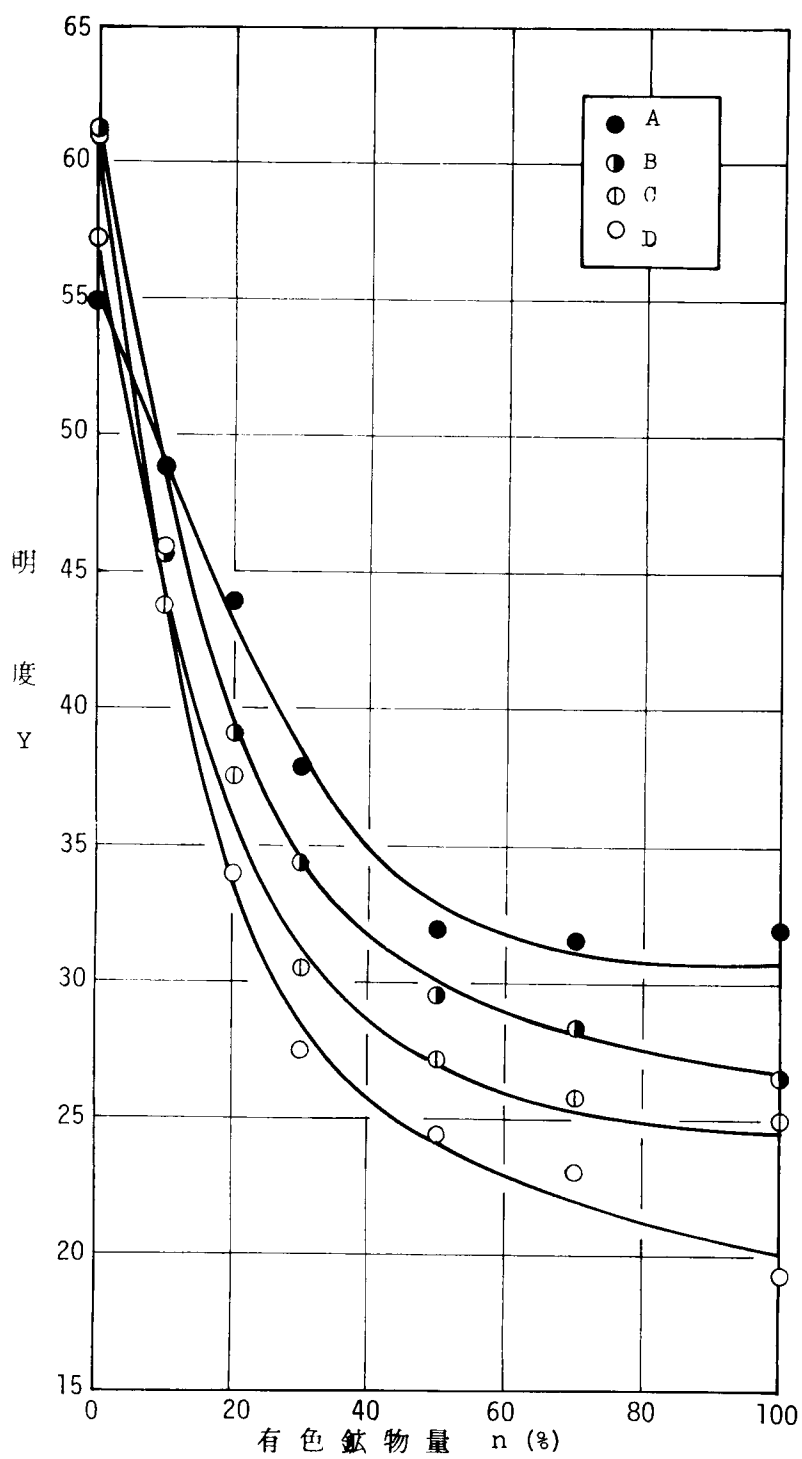


図2・20 有色鉍物量と明度

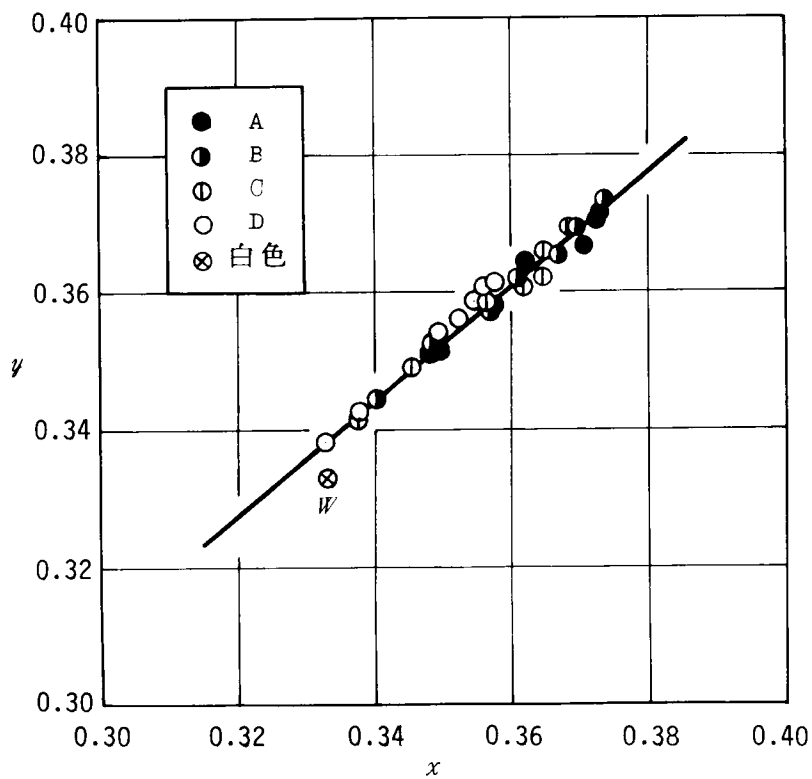


図 2・21 有色鉍物量の変化による色度図

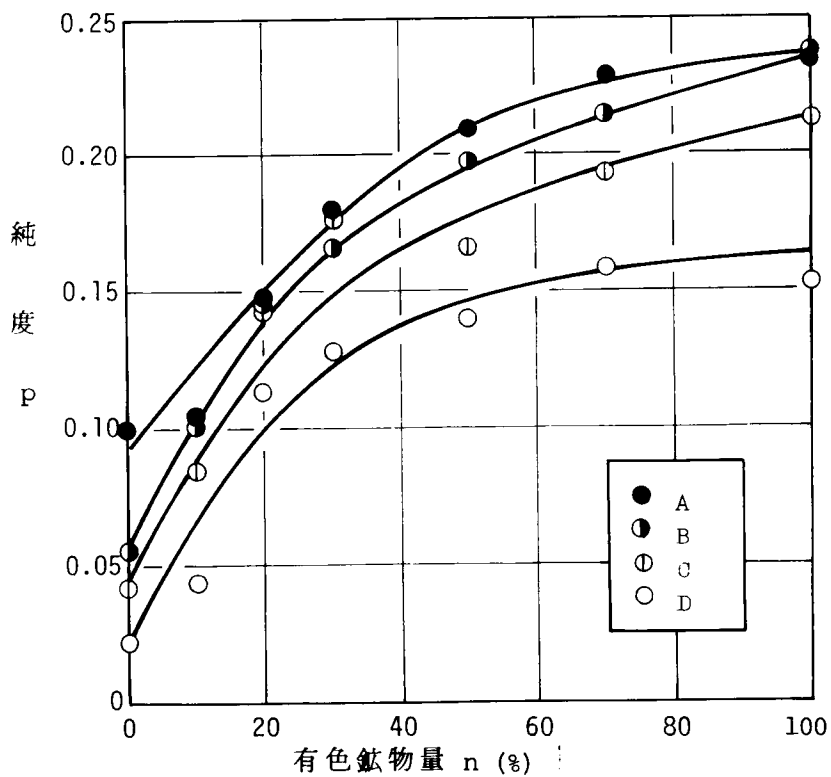


図 2・22 有色鉍物量と純度

たい 10 ～ 30 % で、多くても 40 % までであり、この範囲では明度は有色鉍物量と一次的関係にある。

図 2・21 は、この場合の色度図である。すべての測定点が一つの直線上に分布する。この直線は白色の点 W からわずかにずれているが、スペクトル線とは、 $577\text{ m}\mu$ で交わる。すなわち、ここで測定したマサ土の乾燥状態の主波長は、有色鉍物量に関係なく約 $577\text{ m}\mu$ である。これは黄色に相当する波長である。

図 2・22 は、色度図より求めた純度 (p) と有色鉍物量の関係である。有色鉍物量の増加とともに純度が増大し、あざやかな色へ変化していく。この場合も、有色鉍物量 50 % 以上では、純度の増大割合は小さくなっている。

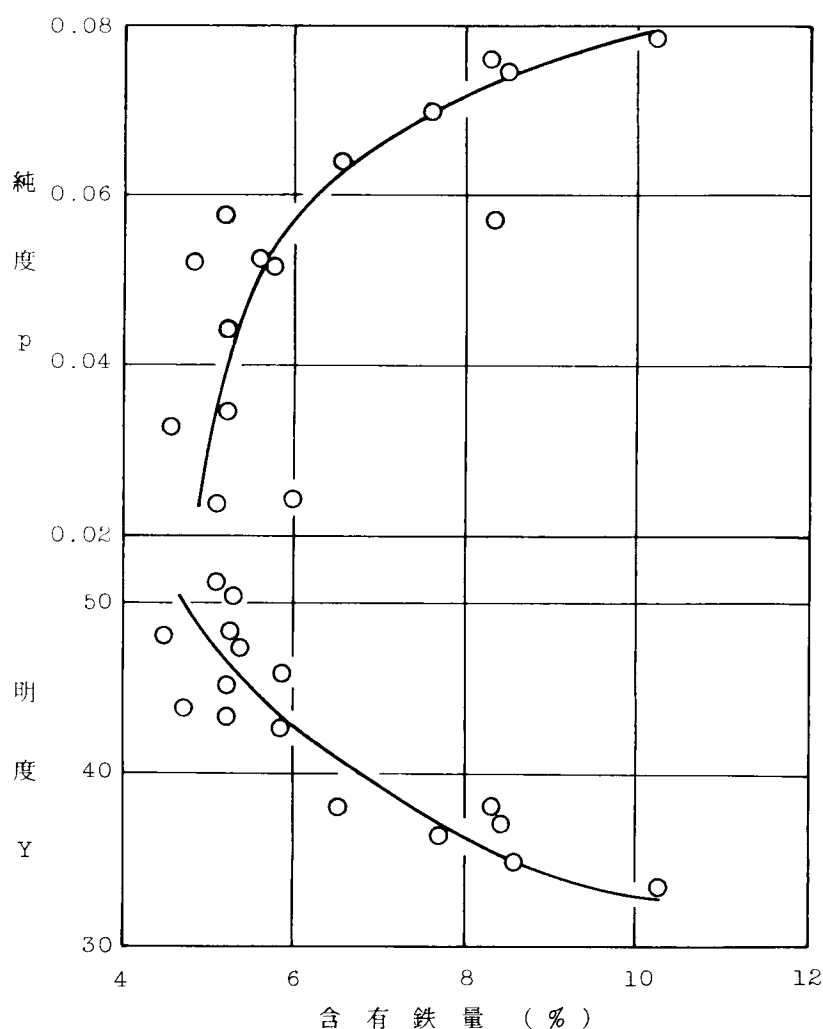


図 2・23 含有鉄量と色

生駒山の地すべり地域のボーリングから採取したマサ土について、含有鉄量と色との関係を示したのが図2・23である。⁴⁾ 含有鉄量は試料を 74μ 以下に粉碎し、無水けい酸ナトリウムにより溶融し、溶融液の原子吸光分析より求めた。また、別に6Nの塩酸にて4時間溶出して、粒子表面に被覆している遊離鉄量を測定し、含有鉄量との比（遊離鉄比と呼ぶ）を求めた。図2・24は遊離鉄比と色の関係である。

両図ともに、図2・20、図2・22と類似の傾向を示し、有色鉱物中の鉄分が土の色に関係していると考えられる。とくに、遊離鉄比は、マサ土の風化に伴う

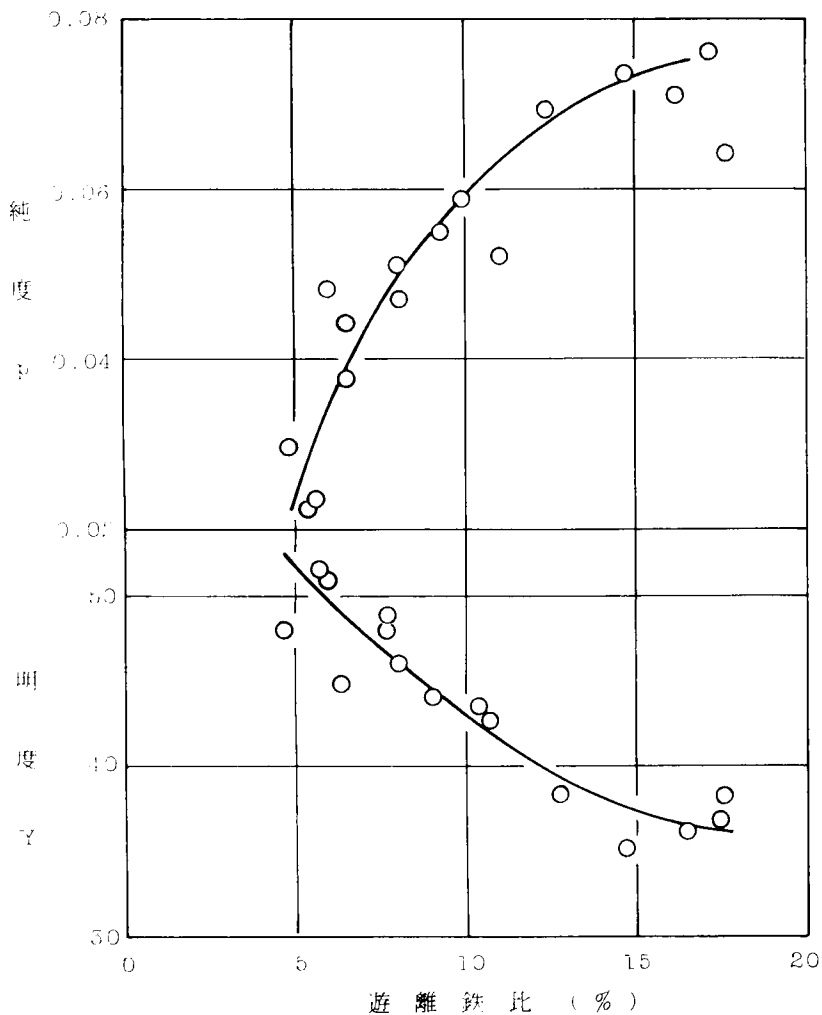


図2・24 遊離鉄比と色

有色鉱物の変質と関係があり、土の色により風化度を判定できることを暗示している。しかし、このように色によって風化度を判定する場合、遊離鉄が地下水水流などの影響を受けていると、実際とは異なる結果になることに注意せねばならない。

一方、図2・25は生駒のボーリング試料を塩酸により処理して、含有鉄分を除去していった場合のマサ土の色（色の指標としては426 $m\mu$ 反射率を用いた）を示したもので、Coleman⁴²⁾が各種の土の含有鉄量と色との関係を研究して得た曲線（実線）に近い値を示している。図中の破線はColemanがカオリナイトに酸化鉄を混合して得た結果を表わしている。実際の土では、酸化鉄は粒子を被覆しているが、単に混合しただけの試料では同じ含有鉄量でも色の様相は異なる。つまり、酸化鉄で被覆着色された粒子により、土の色が発現されるわけである。

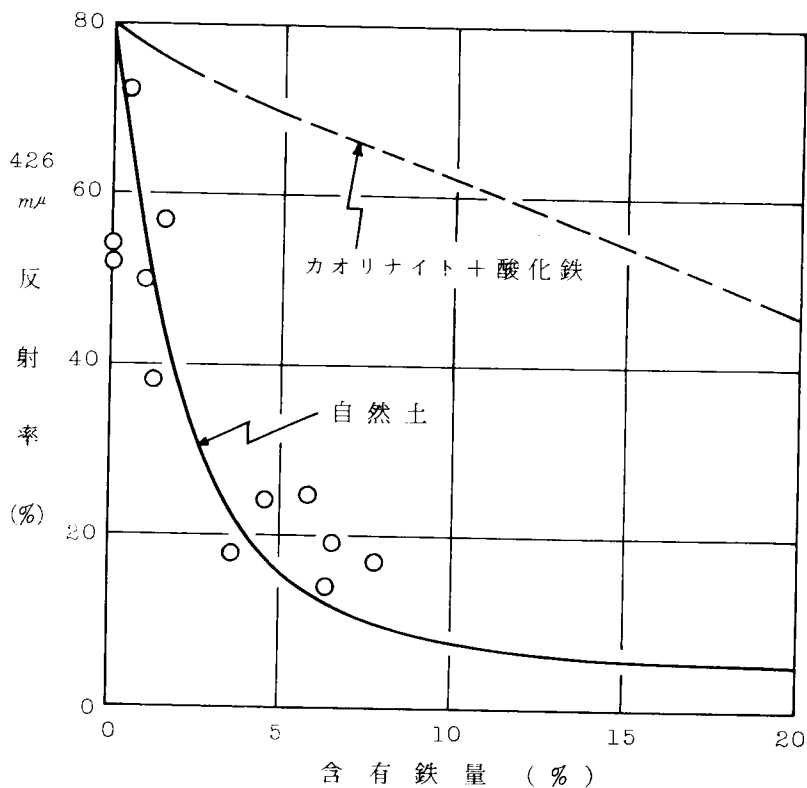


図2・25 含有鉄量と426 $m\mu$ 反射率

2.5.4 風化度と色調の関係

図2・26は、比叡山試料の乾燥状態において、風化度の指標としてのみかけ比重（Ga）と明度の関係を示した。

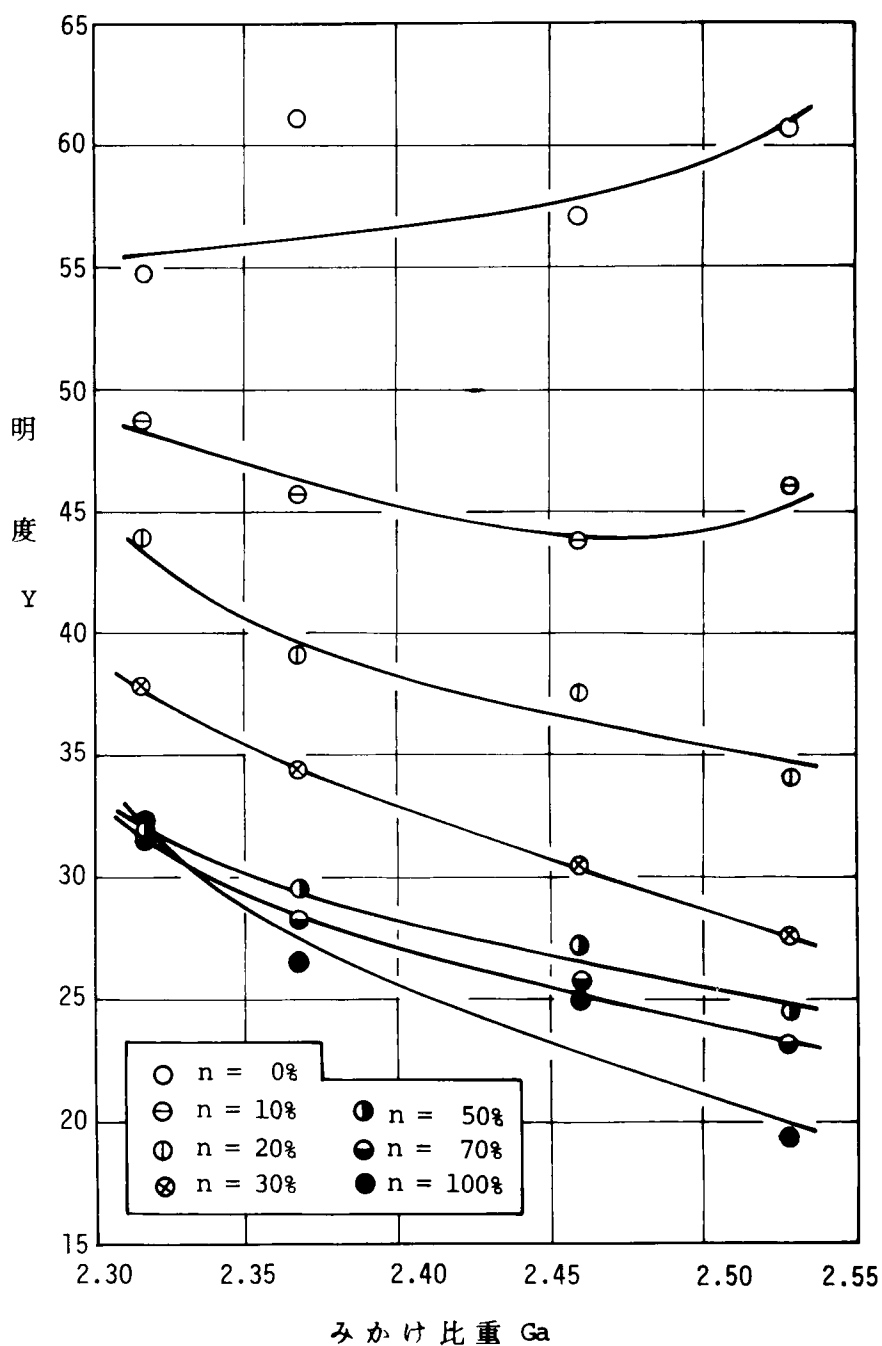


図2・26 風化度と明度

有色鉱物量 $n = 100\%$ ，すなわち有色鉱物のみの場合，その明度は風化の進行（みかけ比重の減少）とともに増大する。図2・27は，マサ土を塩酸で処理した場合の明度の変化を土中の Fe_2O_3 量との関係で示している。 Fe_2O_3 はおもに有色鉱物中に含まれて，有色鉱物の色を決定しているものであり，その溶脱により明度が増大している様子がよくわかる。風化の過程においても， Fe_2O_3 が溶脱され，それにより有色鉱物の明度が増大していくと考えられる。そして，この有色鉱物がマサ土の明度に影響を与えている。

図2・26において $n = 0\%$ ，すなわちけい長鉱物のみでは，風化による明度の変化は，上記と逆の傾向になり，風化の進んでいる試料ほど明度が小さくなっている。これは，風化により有色鉱物から溶脱された Fe_2O_3 などがけい長鉱物表面に付着して，けい長鉱物を着色するためであろう。

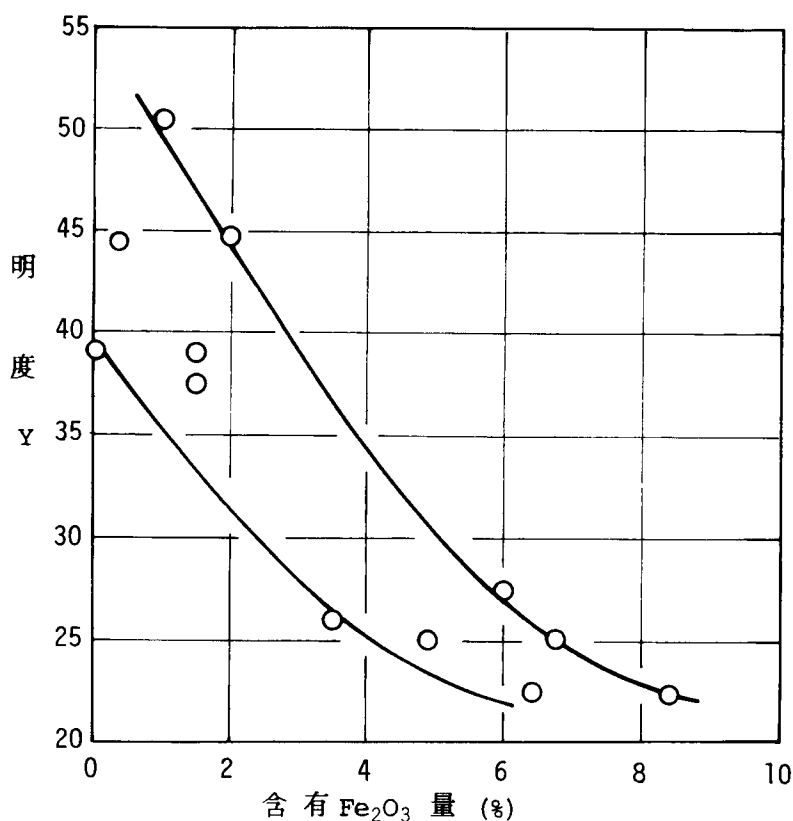


図2・27 含有 Fe_2O_3 量と明度

$n = 0\%$ と $n = 100\%$ の中間の試料は、有色鉱物、けい長鉱物のみの明度変化の相互作用を受ける。 n が 100% から減少するにつれて、各試料間の明度の差は小さくなり、 $n = 10\%$ 付近で風化に伴う明度の変化が逆転する。

図2・28は、みかけ比重と純度の関係である。どの有色鉱物量の場合も、風化の進行に伴い純度は大きくなる。すなわち、風化度と色調の関係の指標としては、純度を用いることもできる。

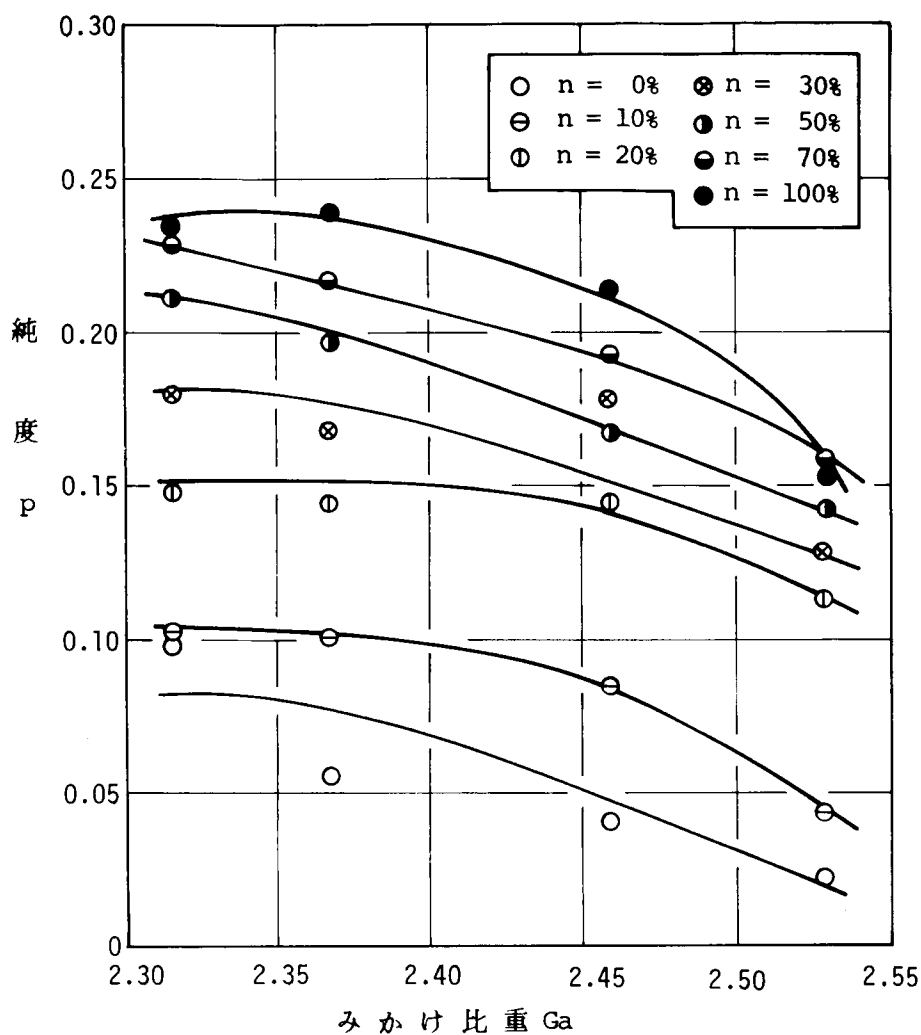


図2・28 風化度と純度

2.5.5 色調によるマサ土の有色鉱物量と風化度の判定

図2・29は、明度(Y)および純度(P)を両座標にして、乾燥状態の各試料を示したものである。図中に描いた等風化度線と等有色鉱物量線をもとにして、任意の明度と純度を持つ試料の風化程度と有色鉱物量が決定できる。また、実在するマサ土の有色鉱物量は、ほとんど30%までであるから、 $n = 0 \sim 30\%$ について、有色鉱物量を縦軸、風化度（みかけ比重）を横軸にとってプロットすると、図2・30のようになる。この図中には、等明度線と等純度線が描け、乾燥状態で任意のマサ土の色調（明度と純度）を測定することにより、風化度と有色鉱物量が求められる。

比叡山の7種のマサ土について、色調により有色鉱物量と風化度を判定し（図2・30参照）、その結果を従来の方法と比較して表2・3に示した。両者はおお

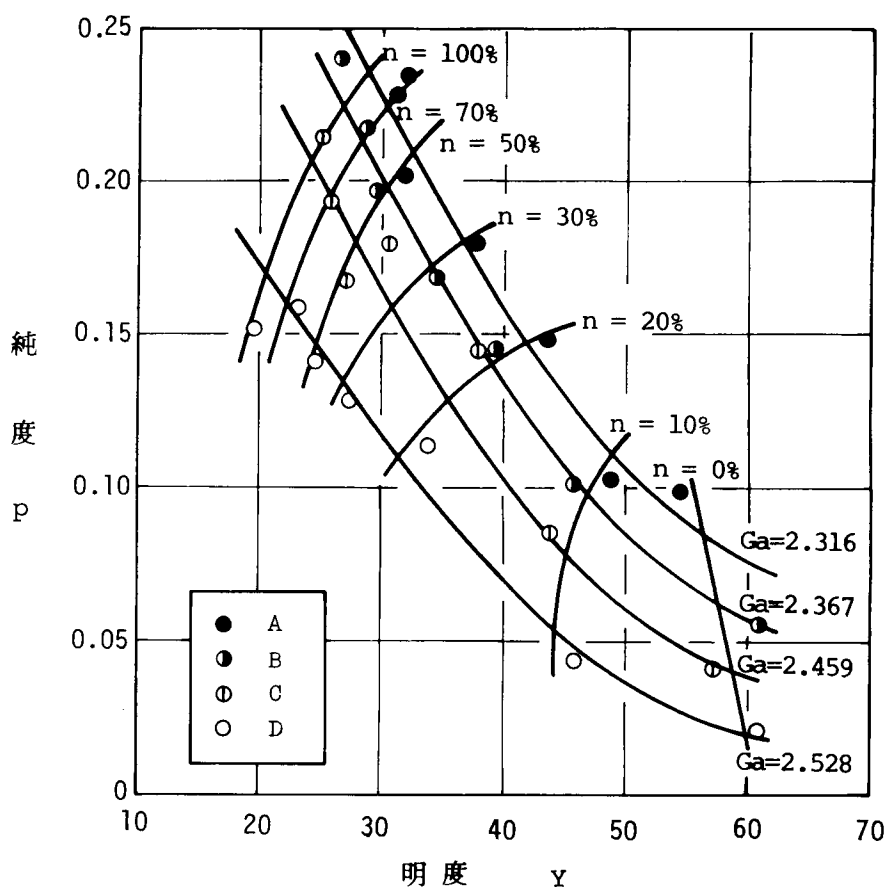


図2・29 明度・純度座標上での有色鉱物量と風化度の判定

むねよく似た値を示し、有色鉍物量、風化度の概略の傾向を色調測定により簡便に判定できる。

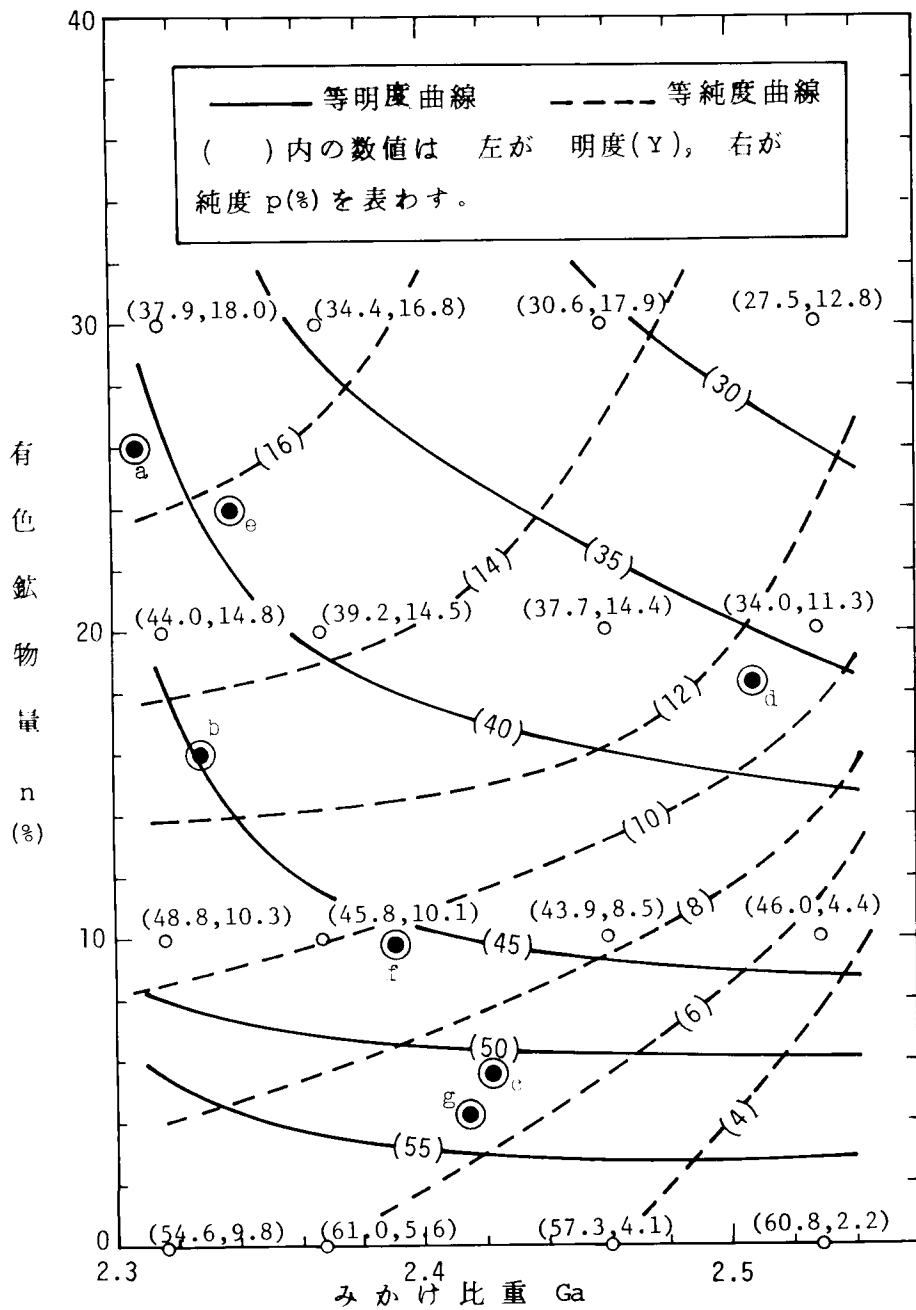


図2・30 有色鉍物量・みかけ比重座標上での等明度曲線と等純度曲線

表 2・3 色調による風化度、有色鉱物量の判定と従来の方法との比較

試料	明 度 Y	純 度 P (%)	み か け 比 重		有 色 鉱 物 量 (%)	
			従来の方法	図2・30より	従来の方法	図2・30より
a	40.9	16.5	2.316	2.31	26.14	26.0
b	44.9	13.0	2.367	2.33	13.49	16.0
c	50.5	6.9	2.459	2.42	10.64	5.5
d	36.7	11.4	2.528	2.51	11.26	18.5
e	39.1	15.8	2.361	2.34	19.12	24.0
f	46.7	9.7	2.430	2.39	13.24	10.0
g	53.4	6.6	2.469	2.41	9.99	4.5

2.6 結 語

マサ土の風化特性とその表示方法について、実験的に研究した結果、つぎのような結論を得た。

- (1) 花崗岩の風化は、まず石英－長石の粒界が弱体化する。つぎに各粒子が影響を受けるが、おもに石英内に欠陥が生じるものと、長石の変質が優勢なものがあり、前者は物理的風化に起因し、後者は化学的風化によるものである。
- (2) 物理的風化により生じるマサ土は石英粒子が弱体化し、細粒化していく。石英粒子の細粒化は潜在的なクラックから生じ、進行していく。
- (3) 化学的風化が優勢なマサ土は、長石が変質して粘土化していく。長石粒子の分解は、粒子のへき開性に基づく欠陥から行われ、粉碎化していく。
- (4) 風化度の指標として用いられている単位体積重量、吸水率は化学的な風化をおもに表わすもので、物理的風化を表示するものとしては、反発係数が適する。
- (5) 風化が進行すると、マサ土内の有色鉱物中の酸化鉄の溶脱により、マサ土の色は明るい白に近づく。したがって、マサ土の色調により、風化度を判定できる。土の色の指標としては、明度と純度が有効である。
- (6) マサ土の乾燥状態で、明度と純度を求めると、図2・30を用いて、有色鉱物量と風化度を同時に決定することができる。

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎監訳：風化－その理論と実態，ラティス，pp.6～62, 1971.
- 2) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土粒子表面の微視的特徴と粒子の破砕性について
の考察，第27回土木学会年次学術講演会概要集（第3部），pp.587～588，
1972.
- 3) 土質工学会編：土質調査法，p.697，1972.
- 4) 田中茂：昭和42年7月豪雨による崩壊斜面の基礎調査，建設工学研究所報
告，第11号，p.146，1968.
- 5) 前出3)，p.698.
- 6) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土の調査・試験法とその適応，施工技術，第9巻，
第1号，pp.97～104，1976.
- 7) 土質工学会：本州四国連絡道路に係る道路土工指針作成のための調査報告書，
p.11, 1976.
- 8) 松尾新一郎，西田一彦：花崗岩の真砂化とその物理的・工学的諸性質につい
て，京都大学工業教員養成所研究報告，No.3，pp.63～68，1966.
- 9) 中井喜一郎：マサ土の風化について－深層風化－，第18回土質工学シンポ
ジウム発表論文集，土質工学会，pp.1～11, 1973.
- 10) 中井喜一郎，米倉亮三：マサ土の施工法，土質工学会マサ土研究委員会編，
マサ土の工学的性質とその取扱い指針，pp.166～180，1970.
- 11) Iliev, I. G. : An Attempt to Estimate the Degree of Weathering of
Intrusive Rocks from their Physico-mechanical Properties, Proc.
1st. Conf. Int. Soc. Rock Mechanics, Vol. 1, pp.109～114, 1966.
- 12) 竹中準之介，渡辺興一：まさ土中の切取斜面，第22回土木学会年次学術講
演会講演概要集（第3部），pp.33-1～33-8，1967.
- 13) 松浦誠，芳賀保夫：直接基礎の基盤としてのマサ土地盤，第18回土質工学
シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp.89～92，1973.
- 14) 青山千影，遠山茂行，西田一彦：マサ土地帯の風化層断面の性状について，
第31回土木学会年次学術講演会概要集（第3部），pp.35～36，1976.

- 15) 松尾新一郎, 西田一彦, 中井喜一郎, 澤孝平: マサ土地盤のサウンディングの現状紹介, 土と基礎, Vol. 24, No. 7, pp. 39 ~ 43, 1976.
- 16) 三浦清: 豪雨によって発生する花崗岩山地の崩壊現象とその特質, 応用地質, 第7巻, 第3号, pp. 145 ~ 158, 1966.
- 17) Matsuo, S. and Nishida, K. : Physical and Chemical Properties of Decomposed Granite Soil Grains, Soils and Foundations, Vol. 8, No. 4, pp. 10 ~ 20, 1968.
- 18) Matsuo, S. and Nishida, K. : Properties of Decomposed Granite Soil Grains and their Influence on Permeability, Soils and Foundations, Vol. 10, No. 1, pp. 93 ~ 105, 1970.
- 19) Hamrol, A. : A Quantitative Classification of the Weathering and Weatherability of Rocks, Proc. of the 5th Int. Conf. S. M. F. E., Vol. 2, pp. 771 ~ 774, 1957.
- 20) 渋谷長美: 岩石の風化と孔隙率(花崗岩について), 応用地質, Vol. 1, No. 3, pp. 12 ~ 18, 1965.
- 21) Onodera, T., Oda, M. and Minami, K. : Shear Strength of Undisturbed Sample of Decomposed Granite Soil, Soils and Foundations, Vol. 16, No. 1, pp. 17 ~ 26, 1976.
- 22) 西田一彦, 青山千彰: 花崗岩風化層の間ゲキ径分布と水分吸着特性について, 応用地質, 第20巻, 第1号, pp. 3 ~ 12, 1979.
- 23) 柏木日出治: 花崗岩の風化の研究(予報), 広島大学地学研究報告, Vol. 2, pp. 319 ~ 342, 1963.
- 24) 三野与吉編: 自然地理学研究法, 朝倉書店, pp. 55 ~ 73, 1963.
- 25) Lumb, P. : The Properties of Decomposed Granite, Geotechnique, Vol. 12, No. 3, pp. 226 ~ 243, 1962.
- 26) 西田一彦, 福田護: 岩石の風化と風化残積土の工学的性質, 土質工学会関西支部講習会テキスト, 地質学と土質工学の境界領域の問題点, pp. 105 ~ 134, 1973.
- 27) 松尾新一郎, 澤孝平: 風化花崗岩の破断面観察に基づく風化形式の判定およ

- びその表示方法, 土質工学会論文報告集, Vol. 12, No. 4, pp. 105 ~ 112, 1972.
- 28) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, 東大出版会, pp. 15 ~ 18, 1967.
- 29) たとえば多田政忠: 力学概説, 学術図書, p. 152, 1960.
- 30) 西松裕一: 岩石強度の標準試験方法, 日本鉱業学会誌, Vol. 81, No. 926, pp. 563 ~ 570, 1965.
- 31) 松尾新一郎, 西田一彦: マサ土粒子の物理・化学的性質について, 第2回土質工学研究発表会講演集, pp. 1 ~ 6, 1967.
- 32) Noild, J. L. and Erickson, K. P.: Changes in K-feldspar Straining Method and Adaptations for Field Use, The American Mineralogist, Vol. 52, p. 1575, 1967.
- 33) たとえば前出 28), p. 97.
- 34) 松尾新一郎, 西田一彦: マサ土のセメント安定処理効果について, 京都大学工業教員養生所報告, Vol. 4, pp. 53 ~ 58, 1968.
- 35) 早瀬一: 真砂花崗岩の顕微鏡的特徴, マサ土研究委員会資料, pp. 1 ~ 3, 1961.
- 36) 松尾新一郎, 澤孝平: マサ土の色調の表示方法とそれによる有色鉱物量および風化度の判定について, 土質工学会論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 113 ~ 122, 1973.
- 37) 山口昌一, 川上元郎: 色彩工学入門, オーム社, pp. 22 ~ 74, 1968.
- 38) 稲村耕雄, 中村勝儼共訳: 色彩の秘密, 白水社, pp. 69 ~ 94, 1955.
- 39) 川上元郎: 色の常識, 日本規格協会, pp. 4 ~ 77, 1974.
- 40) Bushnell, T. M.: Vocabularies of Soil Color Terms, American Soil Survey Assoc., Vol. 7, pp. 93 ~ 96, 1926.
- 41) 松尾新一郎, 澤孝平: マサ土の風化度と色調の相関性についての実験的研究, 第26回土木学会年次学術講演会概要集(第3部), pp. 325 ~ 326, 1971.
- 42) Coleman, J. D.: The Measurement of Color in relation to the Structural Analysis of Soil, Proc. of the 6th Int. Conf. S. M. F. E., Vol. 1, pp. 26 ~ 30, 1965.

第3章 マサ土粒子の破砕特性に関する研究

3.1 概 説

花崗岩の風化残積土であるマサ土は風化途上にあるために土粒子内に大小の空隙を有しており、粒子が破砕しやすいという特徴がある。そして、この粒子破砕は締固め特性、強度、透水性などの工学的性質に影響を及ぼしている。とくに近年、構造物の規模が大型化する傾向にあり、マサ土のような脆弱な粒子のみならず、ふつうの砂質土についても粒子破砕の影響に関心をもたれている。

Lee, K. L. と Seed, H. B.¹⁾ は川砂について高圧三軸試験による粒子破砕の影響を調べている。三浦ら²⁾ は標準砂を用いて、せん断特性と粒子破砕の関係を明らかにしている。マサ土についても、西田ら³⁾ が高圧三軸試験で粒子破砕と強度の関係を追究している。また、締固め特性と破砕性の関係としては、谷本ら⁴⁾、久保田ら⁵⁾ および松尾ら⁶⁾ の研究がある。

これら破砕性と工学的性質との関係は重要な問題であるが、本章では、この粒子破砕の機構について、とくに各鉱物粒子の破砕性の特徴、粒径による破砕性の相異などを明らかにする。^{7), 8)}

3.2 土粒子の破砕実験方法および破砕性の表示方法

3.2.1 試料と実験方法

試料は比叡山から採取した6種類のマサ土である。その風化度は表3・1に示した。No.1がもっとも風化しており、No.6は岩石に近い。No.1の長石には、粒子の形をしていても手を触れただけでぼろぼろに粉砕できるものがある。このように極端に弱い粒子は実験室に持ち込む際にこわれてしまうものもある。No.6試料はみかけは岩であるが、スコップ等で採取すると個々の粒子に分離するようなマサ土である。

破砕実験は、約200 gの試料をビニール袋に入れ、高さ1.5 mから所要回数

表 3・1 試料の風化度

試料 No.	みかけ比重	風 化
1	2.36	大
2	2.39	
3	2.42	
4	2.45	
5	2.47	
6	2.49	小

コンクリート床に落下させるものであり、落下回数により破砕仕事量を変化させることができる。この方法は、本来、マサ土の各種試験を実施する前の試料調整法として適用されているものであり、簡単に粒子を破砕することができ、破砕仕事量も容易に変えることができる。

まず、試料を 4.76～2.00 mm、2.00～0.84 mm、0.84～0.42 mm の 3 段階に分け、かつその中から石英と長石を重液を用いて分離した。そして、以下の試料について落下法による破砕試験を行った。

- (1) 各粒径ごとに、石英、長石のみの破砕（単独破砕）
- (2) 各粒径ごとに、全鉱物を含んだ試料の破砕（混合破砕）
- (3) 4.76 mm 以下の全粒子を含む試料の破砕

3.2.2 破砕性の表示方法と破砕形式

粒子の破砕性を表示する方法は大別すると、破砕前後の粒度分析結果を比較するものと粒子の表面積を測定し比較するものとに分けられる。

前者の例として、谷本ら⁴⁾は均等係数と各粒径残留率差の総和を用いている。久保田ら⁵⁾は次式で示される平均粒径(D_M)を使用して破砕性を論じている。

$$D_M = \frac{\sum f \cdot d}{\sum f} \quad (3 \cdot 1)$$

ここで、 f ：ふるいの残留率、 d ：ふるい径である。

一方、Lee ら⁹⁾は破碎前後の15%径の比を使用している。すなわち、

$$\text{破 碎 比} = \frac{\text{破碎前の15\%径}}{\text{破碎後の15\%径}} \quad (3 \cdot 2)$$

また、松尾ら¹⁰⁾は74 μ 以下の残留率を用いている。その他粒径加積曲線あるいは頻度曲線を定性的に比較するものは多数ある。

後者は粉体工学の分野で広く使われているもので、その原点は、Rittinger の粉碎理論である。この理論では、「粉碎に要するエネルギーは材料の表面積に正比例する」という。三浦ら²⁾は表面積の増加量で破碎性を示している。また、福本¹¹⁾は比表面積の比を用いている。松尾ら¹²⁾は粒子の塩酸による溶出量が表面積に比例することから、溶出量でもって破碎性を表示している。

以上のように破碎性の表示方法には各種のものがある。ここでは、簡単に測定でき、かつ粒子の破碎特性をうまく表現できるものとして、破碎率と移動率を用いることにする。

単一粒径（均等粒径）の試料を破碎させると、図3・1のような頻度分布になる。破碎率とは、もとの粒径の試料が破碎される割合を百分率で表わす。移動率は、全破碎粒子のうち、細粒化した後ある粒径範囲に存在する量の割合を百分率表示したものである。今回はもとの粒径範囲のすぐ下の粒径範囲への移動率を用いた。いま、2.00～0.84 mmの粒子の破碎試験を例にとると、破碎率、移動率はつぎのように表わせる。

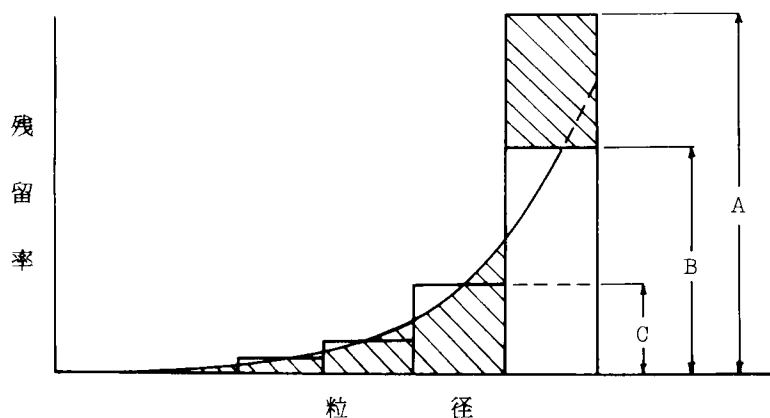


図3・1 単一粒径の破碎性の表示方法説明図

$$\left. \begin{aligned} \text{破碎率 } \alpha &= \frac{A - B}{A} \times 100 \\ \text{移動率 } \gamma &= \frac{C}{A - B} \times 100 \end{aligned} \right\} \quad (3 \cdot 3)$$

ここに、A：破碎前の 2.00 ～ 0.84 mm の量

B：破碎後の 2.00 ～ 0.84 mm の量

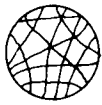
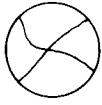
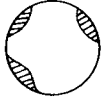
C：破碎後の 0.84 ～ 0.42 mm の量

移動率が大きいほど、破碎粒子はすぐ下の粒径範囲（この場合 0.84 ～ 0.42 mm）に多く留まり、0.42 mm 以下の細粒子に破碎されることが少ないことを意味している。逆に、移動率が小さいほど粒子は破碎されて細粒化しやすいことを示している。このように、移動率は破碎に伴う粒子の細粒化の指標であり、破碎性の質的表現である。これに対して、破碎率は破碎性の量的表現である。

2.1 において述べた石英と長石の微視的表面構造を参考にして、マサ土粒子の破碎形式を示すと、表 3・2 のようにまとめられる。この表には、それぞれの破碎形式で予想される破碎率、および細粒化の相対的な大小関係を示した。破碎率と移動率により破碎の形式が考察できる。

- (1) 完全破碎：粒子は粉々に砕け、粘土粒子にまで破碎する。
- (2) 分割破碎：粒子はいくつかの細粒子に大まかに割れる。
- (3) 部分破碎：粒子の角部のみが欠けていく。

表 3・2 破碎と細粒化の形式

	完全破碎	分割破碎	部分破碎
粒子の破碎 模式図			
破 碎 率	大	大	小
細 粒 化	大	小	大

なお、単一粒径でない、各種の大きさの粒子を含む試料については、上記の方法によって破碎率や移動率を求めることができない。これについては 3.6 において述べる。

3.3 破碎仕事量と破碎性の関係

粒子破碎に及ぼす仕事量の影響を知るために、落下回数を 0, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 回に変化させて、破碎実験を行った。試料はもっとも風化の進んだ No. 1 試料および岩に近い No. 6 試料の 2 種類である。

粉碎工学の分野において、¹³⁾ 粉碎仕事量と粉碎量との関係を述べた粉碎仕事法則では、粉碎仕事量なるものが正確に明示されていない場合が多い。小は粉碎正味仕事量から、大は粉碎機を運転する電動機の消費仕事量まで、数百、数万倍の差異がある。もっとも重要なものは正味仕事量であるが、この正味仕事量の値を正確に求めることは現在のところ困難である。これと同様に落下法による破碎時に加えられた外的仕事量のうち、実際に粒子破碎に使われる割合は不明であるが、ここでは外的に加えた仕事量と粒子破碎の関係を調べてみる。重量 200 g の試料を 150 cm の高さから落下させると、1 回の落下について $30 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ の一定の仕事をするようになる。そこで、本章では落下回数により仕事量を表わすことにする。

図 3・2 は仕事量と破碎率の関係をみるために、横軸に対数目盛で落下回数を、縦軸に普通目盛で破碎率をとったものである。図からわかるように、この両者は直線関係となっており、破碎率は仕事量の対数に比例する。すなわち、落下回数

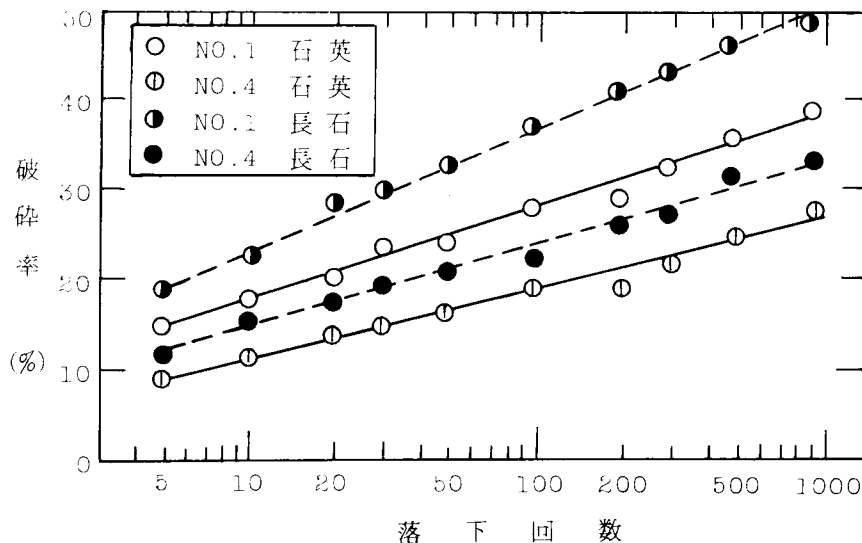


図 3・2 仕事量と破碎率 (0.84~0.42mm)

が多くなると、1回当りの破碎率が減少している。これは仕事量の比較的小さい時点で粒子破碎の大部分が行われていることを示している。

粉碎理論¹⁴⁾によれば、粉碎は自由粉碎と充填粉碎に分けられる。前者は、粉碎されて生じた細かい破片や細粒子を取り除きながら外力を加えていくことによって達成されるもので、材料に外力が作用して最初に粉碎が起る状態を指しており、粉碎効果を上げる最良の方法である。一方、後者は、最初の粉碎によって生成した粉碎物が充填されたままの状態での粉碎を続けていく粉碎形式であって、粗粒と細粒の混合した状態で外力の作用を受けるため、粉碎効果は徐々に減少していく。

本実験は充填粉碎の方法を採用しており、破碎されて細粒化した微細粒子が緩衝材の役割を果たしているため、仕事量が多くなるほど破碎効果が減少していくのである。

図3・3は、落下回数と移動率の関係を表わした。仕事量の増大に伴い、移動率は減少しており、細粒化が進行していることがわかる。細粒化も破碎率と同様に、仕事量の大きいところでは効率が悪くなる。図3・3によると、落下回数100回くらいのところで折線となっており、とくに細粒化が鈍ることがわかる。したがって、以後落下回数は100回位が適当として、各試料の破碎実験を行った。

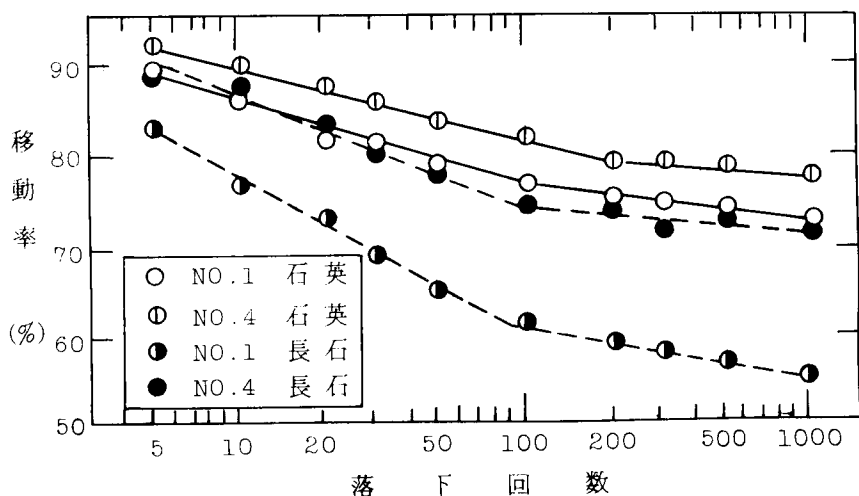


図3・3 仕事量と移動率(0.84~0.42mm)

3.4 単一粒径の各鉱物の破碎性

風化度の異なる6種類のマサ土について、 $4.76 \sim 2.00 \text{ mm}$ 、 $2.00 \sim 0.84 \text{ mm}$ 、 $0.84 \sim 0.42 \text{ mm}$ の3段階の単一粒径試料を用意し、石英および長石の破碎実験を行った。

図3・4は粒径による破碎性の違いをみるためにまとめたものである。風化の進んでいる試料(No.1およびNo.2)を除いて、粒径の大きい試料ほど破碎性が大きいことを示している。これは粒径の大きい粒子ほど潜在的な欠陥を多く有しており破碎されやすいこと、および粒径の小さい粒子は安定状態に近いことなどから当然の結果である。

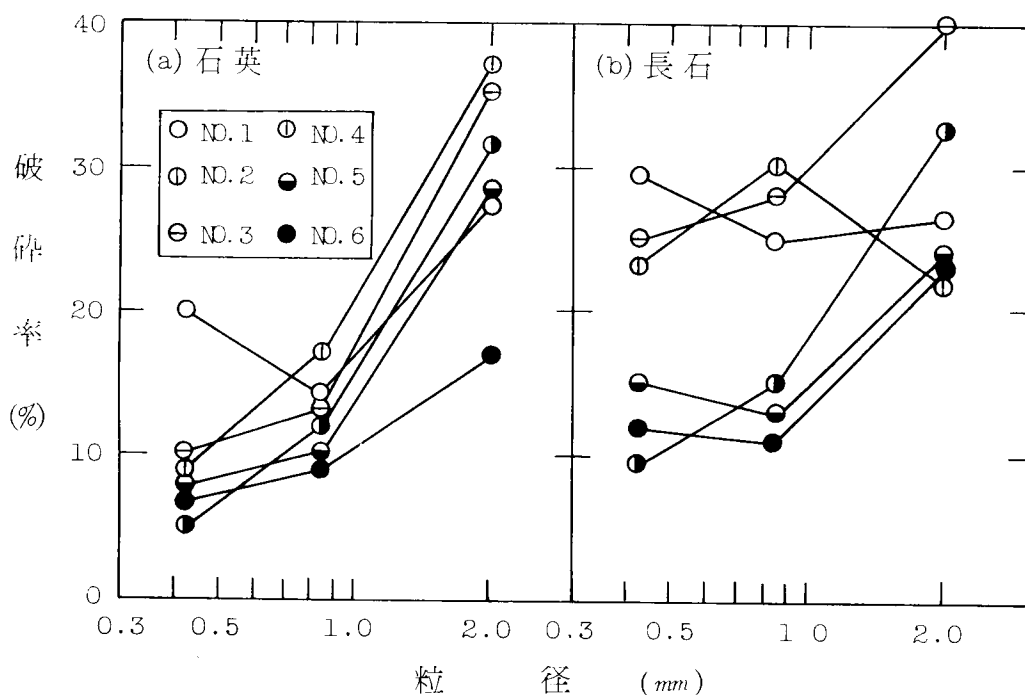


図3・4 粒径による破碎率の相違

図3・5は細粒化の状況を表わす移動率と粒径の関係である。これも風化の進んでいる試料を除いて、粒径の大きいほど移動率が小さく細粒化しやすい傾向にある。とくに、長石がこの傾向を明確に示している。また、長石は石英にくらべて細粒化しやすいことも明らかである。

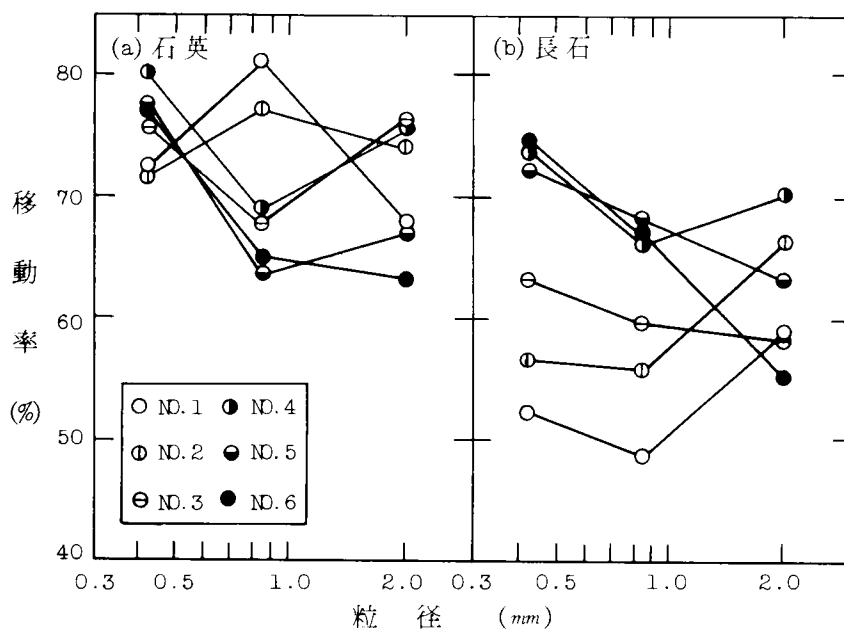


図 3・5 粒径による移動率の相異

風化度の違いによる破碎性の影響を表わしたものが図 3・6 である。この図は風化度として横軸にみかけ比重をとって、各鉱物ごとに破碎率をプロットしている。

粒径の大小にかかわらず、また石英も長石も、風化の進行に伴い破碎率は大きくなっていく。しかし、粗粒域（ $4.76 \sim 2.00 \text{ mm}$ ）の No. 1, No. 2 試料は、風化度が大きいにもかかわらず破碎性が小さい。この原因としては試料の事前破碎が考えられる。すなわち、極端に風化したマサ土粒子は指圧で簡単につぶれてしまう。破碎実験の試料としては、このような破碎を起していない試料を用意する必要があるが、試料の採取・運搬時、あるいは、ふるい分け時に十分な注意を払っていたにもかかわらず、風化して弱くなった粒子が実験前に破碎されていたと考えられる。したがって、粗粒域の風化度の大きい試料の破碎率は、本来もう少し大きくなるはずである。

図 3・7 は移動率と風化度の関係を示している。風化の進行につれて、とくに長石が細粒化することが明かである。石英の細粒化はみられない。

以上の図より、石英、長石の鉱物別の破碎性を考察してみるとつぎのようになる。

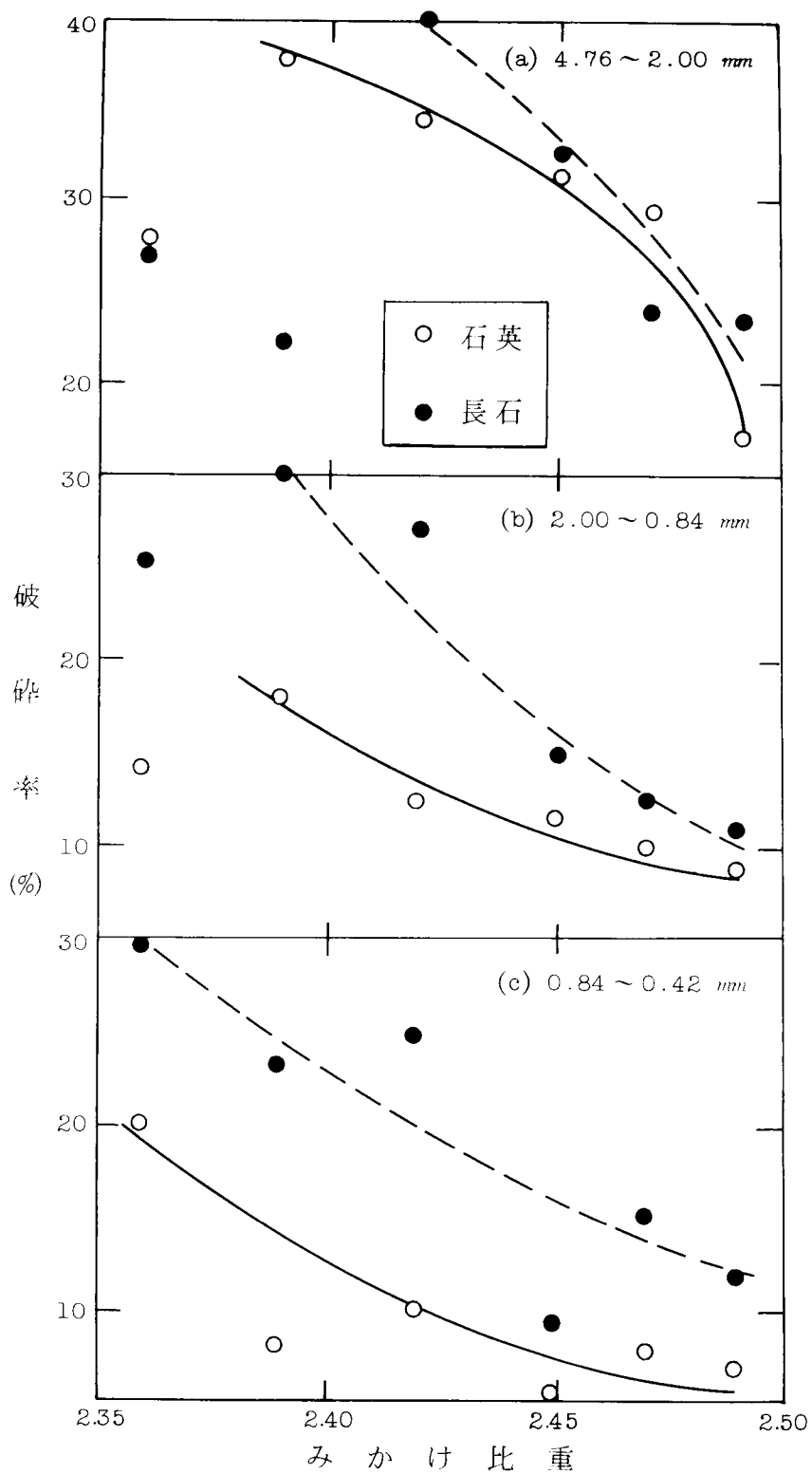


図3・6 風化度と破碎率

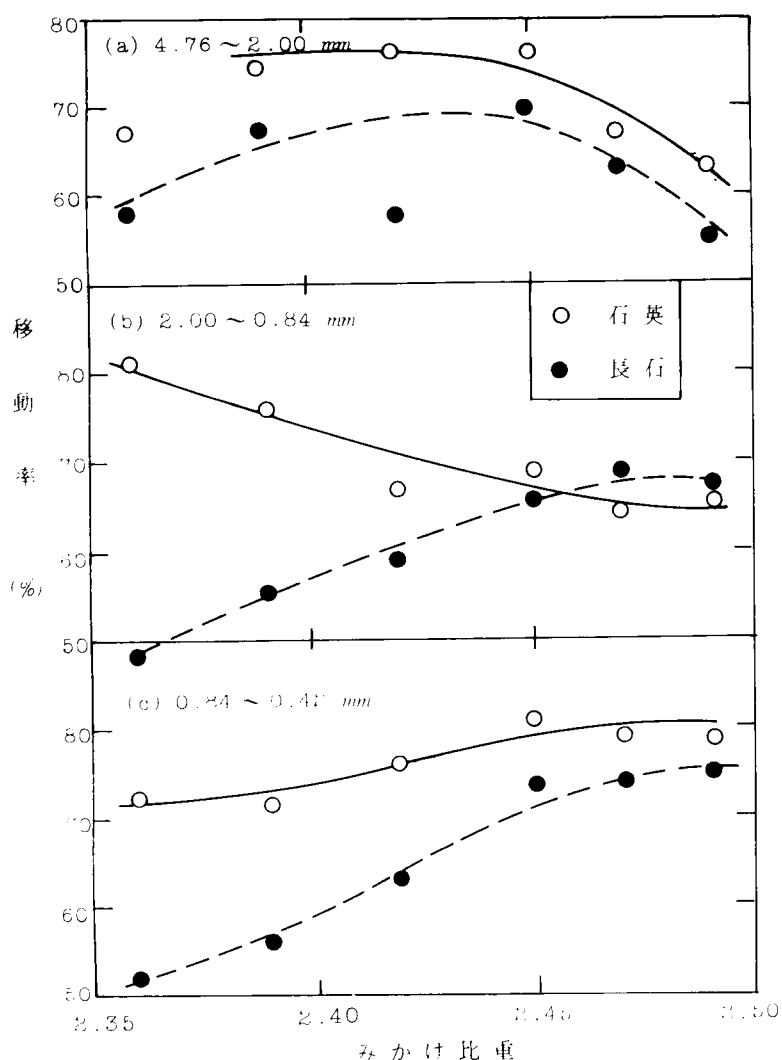


図3・7 風化度と移動率

粗粒域の石英は長石と同程度の破砕率を示しているが、細粒域では、長石の破砕性が石英のそれより大きくなる。このように、粗粒域では従来強固とされていた石英も長石と同程度の破砕性を示すことに注目すべきである。鉍物による細粒化の違いは図3・5にもっとも明確に現われており、風化の進んだ長石の細粒化が目立つ。これは長石粒子が表3・2の完全破砕を起していることを示すものである。これに対して、石英は細粒化を起さないのので、分割破砕をしていると考えられる。一方、風化度の小さい粒子の破砕形式は、部分破砕と考えてよい。

各状態における破砕形式をまとめてみると、表3・3のようになる。

表 3・3 各鉱物の破碎形式

鉱物	粒径	風 化 度	
		大	小
長 石	大	完 全 破 碎	分割破碎又は部分破碎
	小	分割破碎又は完全破碎	部 分 破 碎
石 英	大	分 割 破 碎	部 分 破 碎
	小	部分破碎又は分割破碎	部 分 破 碎

3.5 鉱物混在による選択破碎

図 3・8¹⁵⁾は、6 種類のマサ土について粒径別に破碎実験を実施した後、粒度分析を行い、さらに、各粒径ごとに構成鉱物に分離し、破碎率を表わしたものである。各鉱物への分離は、有色鉱物については磁気分離器を用い、けい長鉱物は重液法により行った。表 3・4 には破碎前の粒径別の組成を示した。

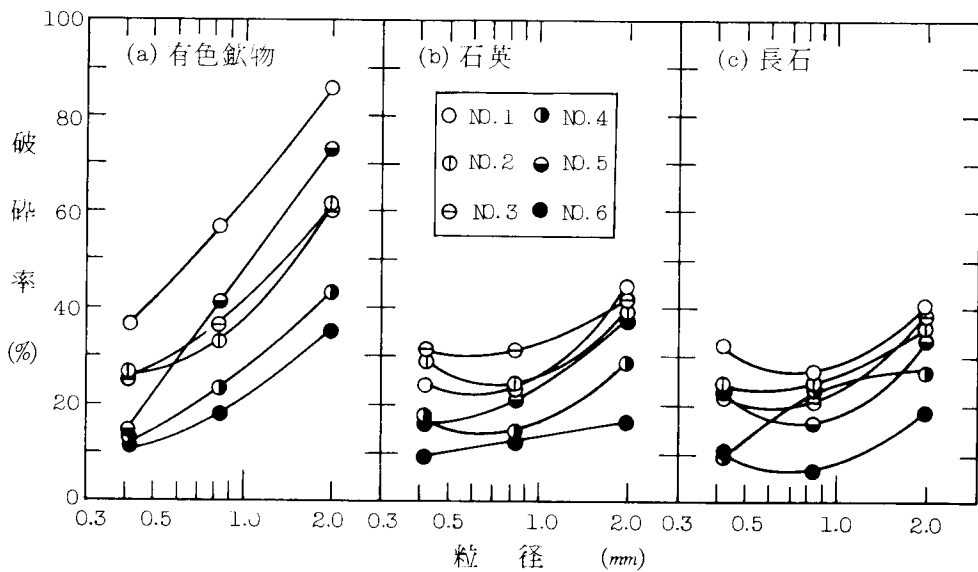


図 3・8 マサ土構成鉱物の破碎性

表 3・4 試料の組成

No.	粒径	組 成 (%)		
		有 色 鉱 物	石 英	長 石
1	A	1.80	50.32	47.88
	B	16.19	51.03	32.78
	C	29.57	47.57	22.86
2	A	7.73	41.38	50.89
	B	13.29	43.83	42.88
	C	18.07	46.00	35.93
3	A	7.50	48.60	43.90
	B	15.16	32.22	52.62
	C	19.32	38.54	42.14
4	A	6.40	39.51	54.09
	B	13.10	45.89	41.01
	C	16.53	44.96	38.51
5	A	3.47	41.28	55.25
	B	9.97	40.40	49.99
	C	16.33	59.61	24.06
6	A	3.29	43.67	53.04
	B	7.46	38.11	54.43
	C	11.83	55.20	32.97

(注)

粒径 A : 4.76~2.00mm

〃 B : 2.00~0.84mm

〃 C : 0.84~0.42mm

図 3・8 によると、粒径の大きい試料における有色鉱物の破砕性は大きいことが明らかである。松尾・西田¹²⁾は、締固め試験における粒子破砕の結論として、雲母（有色鉱物）、長石、石英の順に破砕性が高いとしている。これは各鉱物の破砕抵抗の差異により破砕が選択的に行われるためである。この意味からすると、図 3・8 の石英と長石がほぼ同じ破砕率を示し、鉱物の破砕抵抗も同じくらいであるといえる。しかし、図 3・6 にみられるように、鉱物を単独に破砕した場合には、石英と長石の破砕率に差がある。この矛盾を追究すべく、石英粒子と長石粒子を重量比で 1 : 1 に混合した試料について、破砕実験を行った。

図 3・9 は、鉱物単独破砕と混合破砕の破砕率を比較したものである。長石については単独破砕も混合破砕も同じくらいの破砕性を示している。一方、石英は混合破砕の破砕率が大きく、長石と同じかあるいはそれ以上の破砕性を示すこともある。

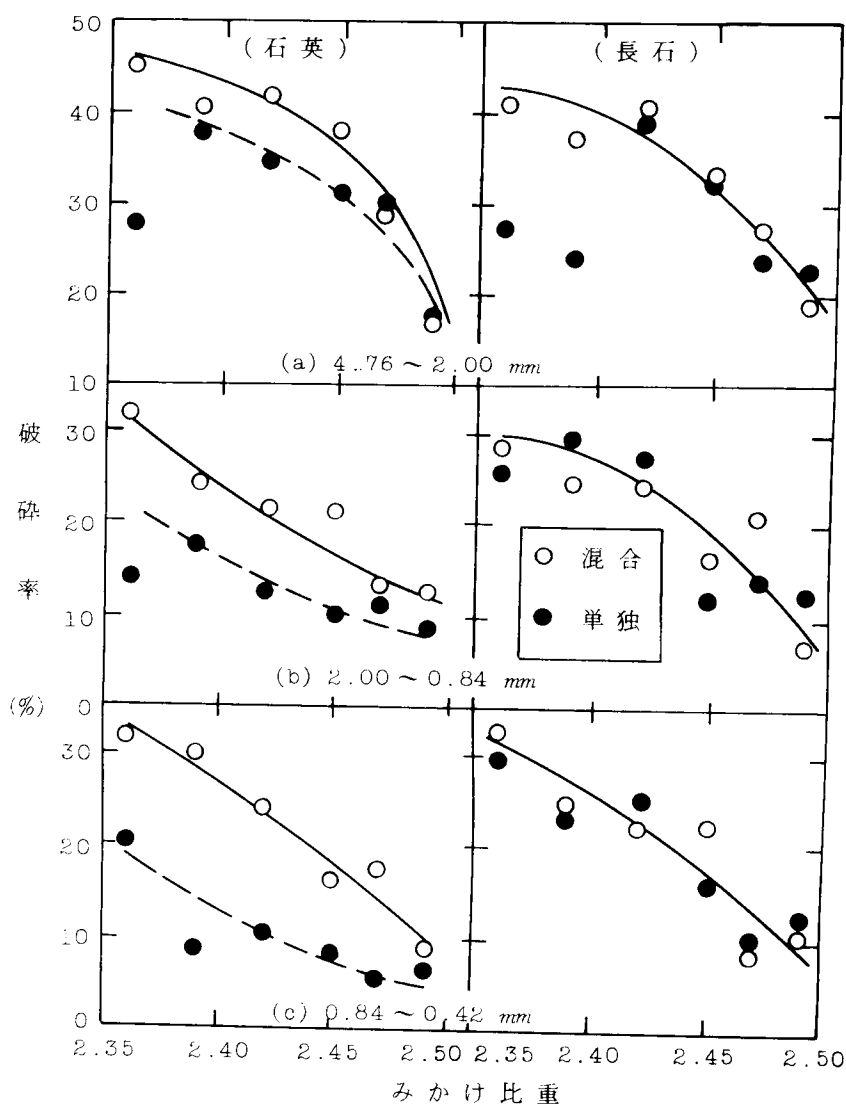


図3・9 混合試料の破砕性

田中ら¹⁶⁾は、粉砕性の異なる2種類の物質が共存するとき、いわゆる硬い物質と軟らかい物質のどちらがどのように選択されて粉砕するかについて図3・10のように単純化した5つのモデルを考えている。この図においては、横軸に粉砕時間 t 、縦軸に粉砕度として比表面積 S をとり、 A_0 、 B_0 は2種類の物質をそれぞれ単独粉砕した場合の粉砕曲線を示す。 A 、 B は2種類の物質を混合させた場合の粉砕曲線である。

(a) 構成成分の単独の粉砕性は全く消失し、両者とも一定の粉砕力に対してあたかも均一材料のように粉砕される。

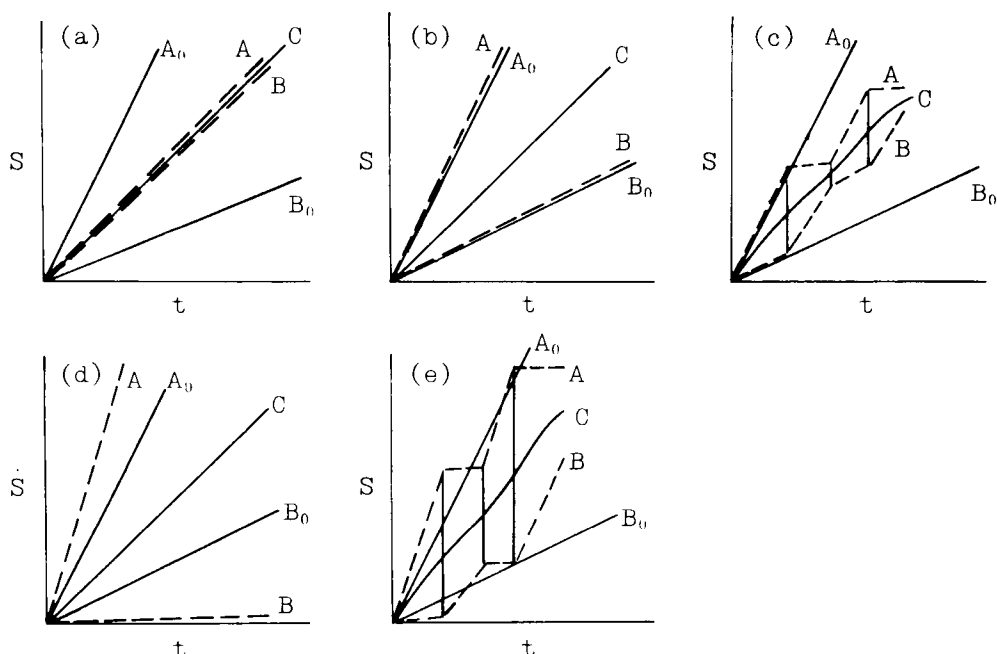


図 3・10 混合粉碎のモデル¹⁶⁾

(b) 各構成成分がそれぞれ単独に粉碎される場合と同じ粉碎曲線を示す。

(c) 粒度による選択性がある場合で、(b)において硬い粒子と軟らかい粒子の大きさは漸次差が開いてくるから、ある粒径比に達すると、硬くて粗い粒子のみが選択されて粉碎をうける。

(d) 粉碎性の違いが強く選択性に影響し、軟らかいものだけが選ばれて粉碎され、硬いものは全く粉碎されない。

(e) 粉碎性と粒度の違いがともに選択性に影響し、(c)と(d)が同時に存在する。

これらのモデルを本実験に適用すると、 A_0 が長石粒子、 B_0 が石英粒子の単独破碎に相当する。横軸の粉碎時間の代りに落下回数を、縦軸の比表面積の代りに破碎率をとって示したのが図 3・11、3・12である。ここではもっとも風化のはげしい No. 1 試料と未風化の No. 6 試料についてまとめた。図中の実線が単独試料の変化であり、破線は混合試料の実験値を結んだものである。

風化の進んでいる No. 1 試料は、破線で示したように、仕事量の増大により、長石粒子の破碎と石英粒子の破碎が交互に現われる。図 3・10 のモデルと比較すると、(c)あるいは(d)に似ている。

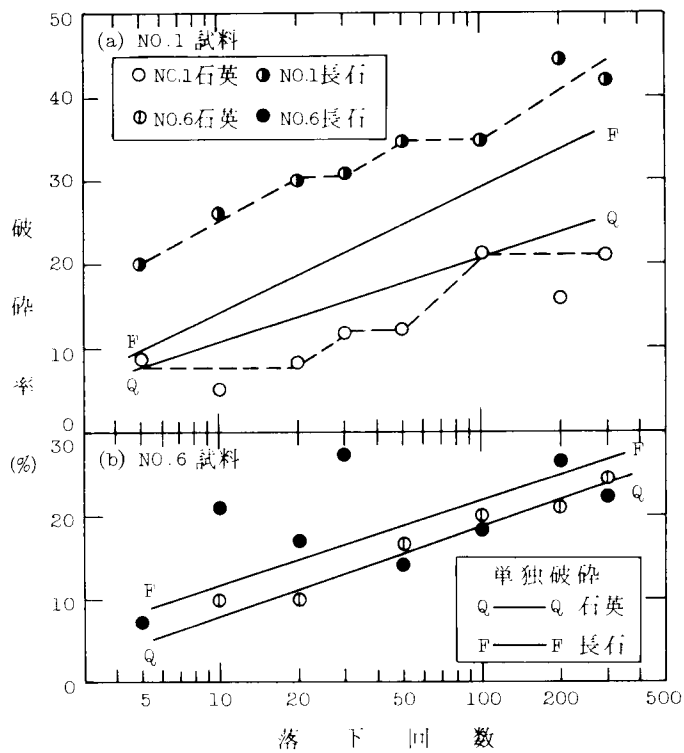


図 3・11 混合試料の破砕性 (2.00~0.84 mm)

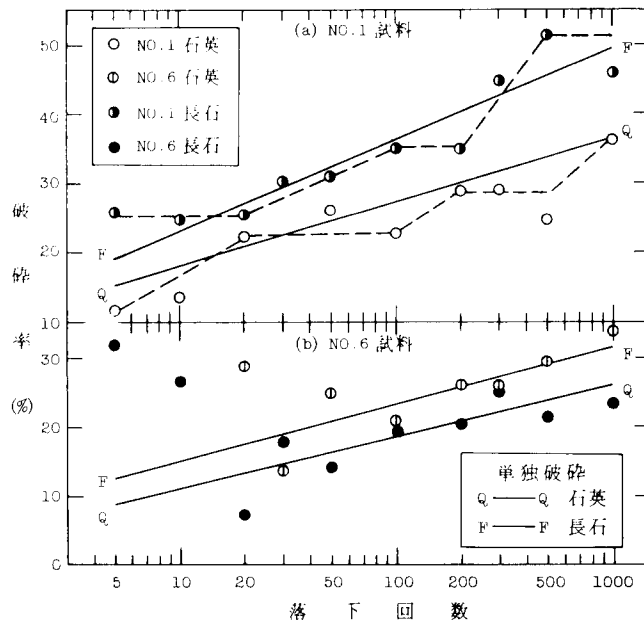


図 3・12 混合試料の破砕性 (0.84~0.42 mm)

すなわち、風化の進んだ試料の混合破碎では、まず粘土化した長石が選択的に破碎され、ついである粒径比になると、堅くて粗い石英が選択的に破碎される。この繰返しにより破碎が増大し、両鉱物の最終的な破碎性はほぼ同じになるものと考えられる。

一方、未風化のNo.6 試料については、石英、長石の破碎性に差がないため、両鉱物の選択破碎性は明らかでない。

3.6 混合粒径試料の破碎性

前節までに、単一粒径のマサ土粒子の破碎性を述べてきたが、あらゆる粒径の粒子が混在するときには、破碎率や移動率はいままでの方法では求められない。したがって、表3・2に示した破碎形式も考えにくい。そこで、混合粒径試料についても破碎形式を検討すべく、破碎前後の粒径加積曲線から、破碎率、移動率を導くことにする。

図3・13は、単一粒径試料を破碎させた前後の粒径加積曲線である。これより、中央径（ D_{50} ）と20%径（ D_{20} ）の変化量を次式で求める。

$$\left. \begin{array}{l} \text{中央径の変化量} \quad H = 1 - \frac{D'_{50}}{D_{50}} \\ \text{20\%径の変化量} \quad I = 1 - \frac{D'_{20}}{D_{20}} \end{array} \right\} \quad (3 \cdot 4)$$

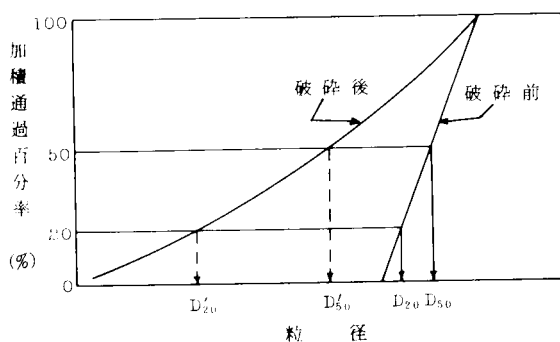


図3・13 単一粒径試料の破碎前後の粒径加積曲線

ここに、 D_{50} 、 D'_{50} ：破砕前後の中央径

D_{20} 、 D'_{20} ：破砕前後の20%径

このHおよびIと、破砕率(α)および、破砕前の粒径のすぐ下の粒径範囲の残留率(β)との関係を示すと図3・14、3・15となる。

なお、図3・1を参考にすると $\beta = C/A$ であり、移動率 $\gamma = \beta/\alpha$ となる。

図3・14、3・15より、 α 、 β はHおよびIと対応する。したがって、H、Iを求めることにより、 α 、 β が決定でき、これらから γ が求められる。

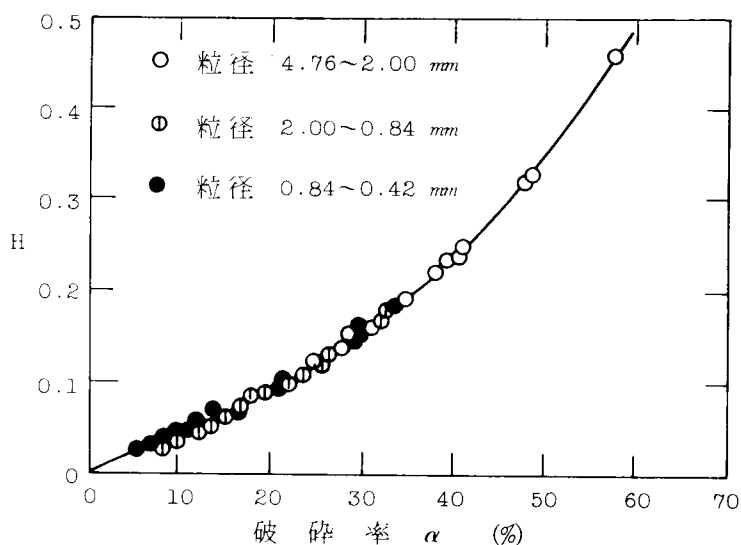


図3・14 Hと破砕率の関係

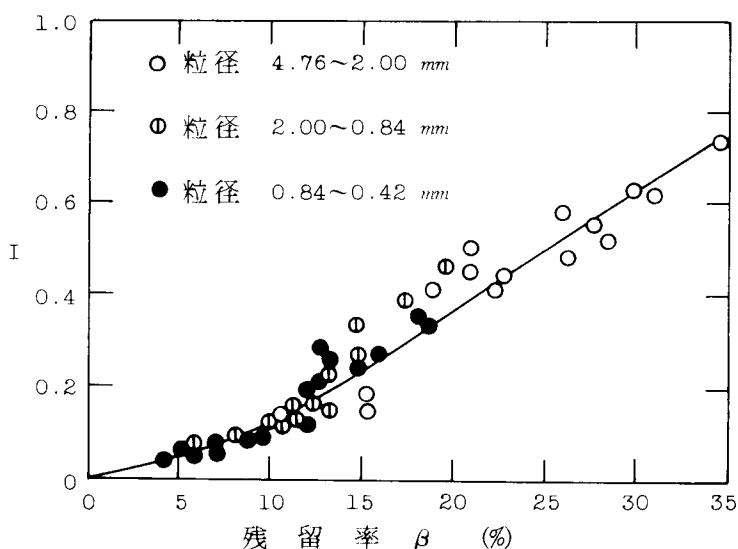


図3・15 Iと残留率の関係

図 3・16は、比叡山の 6 種類のマサ土について、上記の方法で求めた破砕率、移動率と風化度（みかけ比重）の関係である。風化の進行に伴い破砕率は一様に増大し、移動率が減少する。すなわち、風化が進むと破砕しやすく細粒化が進むことを意味する。破砕形式では、長石の完全破砕が現われてくる。これは当然予想された結果であり、粒径加積曲線から求めた破砕率、移動率が一応妥当であることを裏づけるものである。

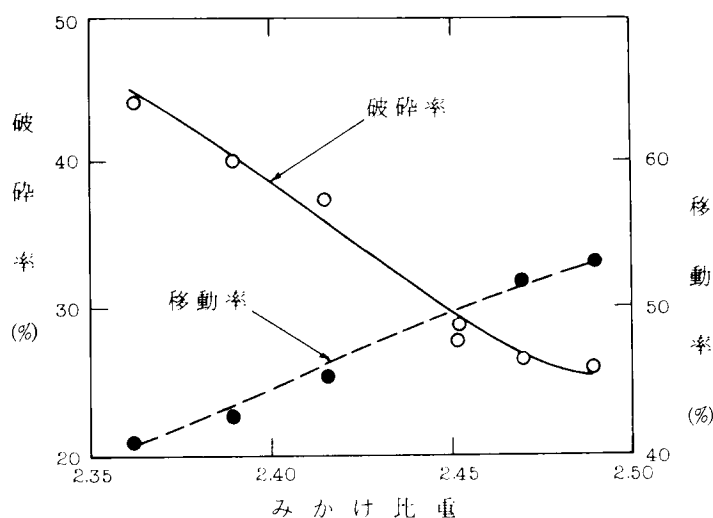


図 3・16 風化度と破砕性

図 3・17は、マサ土中の 0.42 mm 以下の細粒分（ $P_{0.42}$ ）の存在による破砕性の変化を調べるために、風化の大きい No. 1 試料と、風化の小さい No. 6 試料について、あらかじめ細粒分を調整して破砕させた結果である。¹⁷⁾

破砕率は $P_{0.42} = 10\%$ 付近でピークをもち、とくに No. 1 試料では顕著である。細粒化を示す移動率については、 $P_{0.42}$ の増大につれ、細粒化しない傾向を示している。

粒子破砕は純粋に衝撃的に破砕する第 1 の過程と、いったん破砕されたものがさらに圧縮および粒子相互の摩擦などにより細かく碎かれる第 2 の過程と、さらに仕事量が余った場合は、破砕粉体を締固める第 3 の過程に分類して考えられる。¹⁴⁾

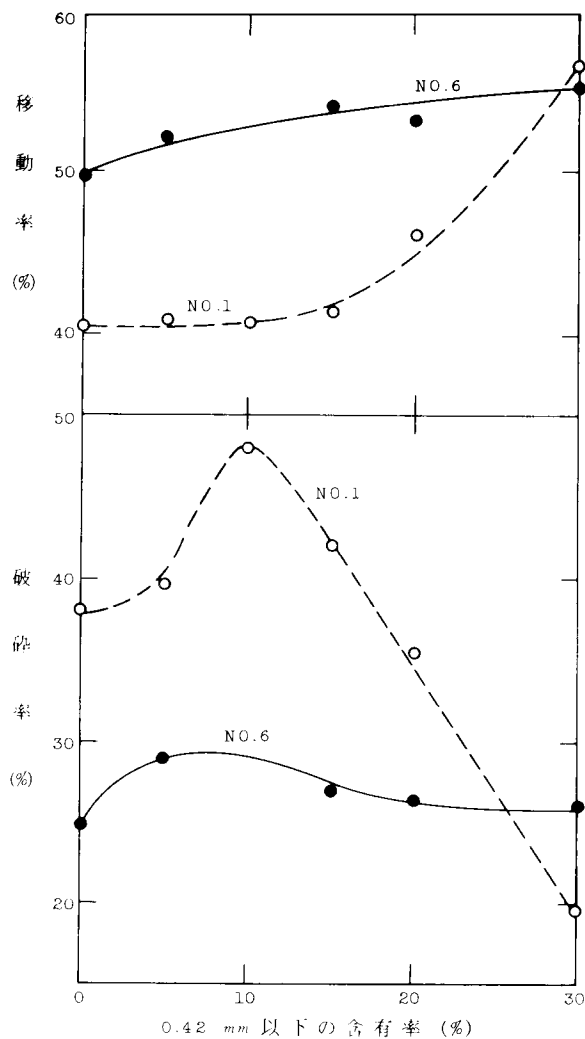


図3・17 細粒分と破砕性

落下法による破砕の場合、一次的な破砕が大部分であるが、細粒分が少し含まれると、二次的破砕も生ずる。No.1 試料の $P_{0.42}=10\%$ 付近で破砕率がピークになるのはこの原理によるものである。しかし、細粒分が増し過ぎると、細粒分が破砕に対して緩衝材の役割を果しているものと考えられる。

破砕率がピークになる $P_{0.42}=10\%$ 付近の移動率をみると、細粒化の傾向はほとんど変化していない。すなわち $P_{0.42}=10\%$ 付近で増大した破砕量は、石英や長石の分割破砕がおもである。細粒分の増大につれて、破砕に伴う細粒化は小さくなる。これは、分割破砕や部分破砕の割合が増して、完全破砕が減少することを示している。

3.7 結 語

マサ土粒子の破碎性について落下法により実験を行った結果、つぎのような結論を得た。

- (1) 破碎性を表示する指標として破碎率と移動率を採用することにより、粒子破碎の量的および質的な表示が可能となる。またこの二つの指標の組合せにより、破碎の形式を、完全破碎、分割破碎、部分破碎の三つに分けて考察することができる。
- (2) 破碎に使用する仕事量が増大すると、粒子の破碎と細粒化が進行する。しかし、単位仕事量当りの破碎量は減少し、破碎効果は低下する。
- (3) 単一粒径で鉱物別に破碎した場合、粒径の大きいものほど、かつ風化の進んだ粒子ほど破碎されやすい。また、長石粒子が石英粒子よりも破碎されやすく、細粒化しやすい。破碎形式としては、長石は完全破碎が起りやすく、石英は分割破碎を生じる。
- (4) 各種鉱物が混じっている試料の粒径別破碎の結果、有色鉱物が破碎しやすく、石英と長石は同程度の破碎性を示す。
- (5) 石英と長石を 1 : 1 に混合した場合、風化の進んだ試料では、石英と長石の堅さの違いにより選択破碎が起る。この現象は、まず粘土化した長石が選択的に破碎され、ついである粒径比になると堅くて粗い石英が選択的に破碎されるものである。未風化試料では、選択破碎の現象は現われないことが明らかとなった。
- (6) 各種の粒径を含んだ試料では、粒径加積曲線の特性値である中央径および 20% 径の変化量から破碎率、移動率を求めることができる。
- (7) 0.42 mm 以下の細粒分を 10% くらい含んでいるマサ土がもっとも破碎されやすい。細粒分が増えると、増大した細粒分が緩衝材となり破碎性は減少する。

参 考 文 献

- 1) Lee, K. L. and Seed, H. B. : Drained Strength Characteristics of Sand, Proc. A. S. C. E. , Vol. 97, No. SM6, pp. 117 ~ 141, 1967.
- 2) 三浦哲郎, 山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集, No. 260, pp. 109 ~ 118, 1977.
- 3) 西田一彦, 香川満: マサ土のせん断特性と土粒子破碎について, 第27回土木学会年次学術講演会概要集(第3部), pp. 569 ~ 572, 1972.
- 4) 谷本喜一, 岩崎照昌, 西勝, 藤吉芳男: 突固めによる土粒子の破碎について, 第7回道路会議論文集, pp. 258 ~ 260, 1963.
- 5) 久保田敬一, 佐藤忠信: 突固めによる土粒子の破碎について, 第22回土木学会年次学術講演会概要集(第3部), pp. 87 - 1 ~ 87 - 2, 1967.
- 6) 松尾新一郎, 福本武明: マサ土の締固め特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 16, No. 4, pp. 93 ~ 102, 1976.
- 7) 松尾新一郎, 澤孝平: マサ土の選択破碎, 第18回土質工学シンポジウム発表論文集, pp. 37 ~ 44, 1973.
- 8) Matsuo, S. and Sawa, K. : Studies of the Crushability of Decomposed Granite Soil Grains, Proc. of the Int. Conf. on Genetic Principles of Eng. Geological Study of Soils and Rocks, pp. 246 ~ 256, 1975.
- 9) Lee, K. L. and Farhoomand, I. : Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 4, No. 1, pp. 68 ~ 86, 1967.
- 10) 松尾新一郎, 西田一彦, 山下親平: 真砂土の組成と工学的性質について, 第22回土木学会年次学術講演会概要集(第3部), pp. 79 - 1 ~ 79 - 4, 1967.
- 11) 福本武明: 締固めたマサ土の密度に関する粒子破碎の影響, 土質工学論文報告集, Vol. 12, No. 3, pp. 55 ~ 63, 1972.
- 12) 松尾新一郎, 西田一彦: 真砂土の工学的性質に関する研究(第3報), 第20回土木学会年次学術講演会概要集(第3部), pp. 2 - 1 ~ 2 - 2, 1965.

- 13) 松居国夫：破砕法則（仕事法則，スケールアップ，粉砕動力），化学工学，Vol. 29， No. 8， pp. 76 ~ 84， 1965 .
- 14) 久保田輝一郎，水渡英二，中川有三，早川宗八郎：粉体－理論と応用－，丸善， p. 10， 1962 .
- 15) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土粒子の破砕性について，第25回土木学会年次学術講演会概要集(第3部)， pp. 347 ~ 348， 1970 .
- 16) 田中達夫，川合清一：粉砕性の異なる2種物質の混合粉砕における選択性と臨界粒径比について，化学工学， Vol. 26， No. 7， pp. 792 ~ 799， 1962 .
- 17) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土の粒度分布特性による破砕性の検討，第28回土木学会年次学術講演会概要集（第3部）， pp. 288 ~ 289， 1973 .

第4章 土粒子の破碎性と締固め特性に関する研究

4.1 概 説

前章で述べた土粒子破碎の工学的な影響として締固め試験時の粒子破碎が問題となる。さらに、土工における転圧時の締固め特性とも密接な関係をもつと考えられる。締固め試験時に粒子が破碎することは、とくにマサ土について数々の報告がなされている。谷本^らは標準締固め試験と CBR 試験により生じる土粒子破碎を論じ、粒子破碎が最適含水比より少し低い含水比で最小になるとしている。一方、久保田^ら²⁾は最適含水比よりわずかに大きい含水比で破碎がもっともはげしいとした。さらに、福本³⁾は土粒子破碎とそれに伴う密度増加との関係を追究し、破碎に伴う締固め密度の増加量を推定している。

本章は、締固め試験におけるマサ土の粒子破碎の状態を実験的に追究し、締固め仕事量と破碎性の関係、含水比、密度と粒子破碎の関係を明らかにしようとするものである。

4.2 試料および実験方法

試料は六甲山系高倉山、横尾山より採取した風化度の異なる4種類のマサ土である。また掛保川より採取した川砂を比較のために用いた。これらの物理的性質は表4・1のようである。みかけ比重より明らかなようにマサAの方が風化が進んでいる。

表4・1 試料の物理的性質

	マサ A	マサ B	マサ C	マサ D	川 砂
真 比 重	2.58	2.62	2.59	2.63	2.72
みかけ比重	2.37	2.43	2.49	2.53	—
均等係数	—	7.7	6.4	5.3	4.8
色	灰白色	赤茶色	灰白色	灰白色	暗灰色

試料は主として(a)気乾状態(含水比 $w = 0.2 \sim 1.0\%$), (b)最適含水比状態($w = 10.5 \sim 12.0\%$), (c)湿潤状態($w = 27.0 \sim 35.0\%$)について締固め, 必要に応じてその中間段階も行った。

締固め試験はハーバード式小型締固め試験機のモールド(内径 3.33 cm , 高さ 7.14 cm , 容積 62.15 cm^3)を用いた。締固めには, ランマー(重量 637 g)による突固めを行った。突固め総仕事量は次式で求められる。

$$E = W_R \times H_R \times N_B \times N_L / V \quad (4 \cdot 1)$$

ここに, E : 突固め総仕事量 ($\text{kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$)

W_R : ランマーの重量 (kg)

H_R : ランマーの落下高さ (cm)

N_B : 突固め回数

N_L : 突固め層数

V : 供試体の容積 (cm^3)

突固めによる土粒子の破砕性の表示は, 破砕前後の粒径加積曲線から, 単一粒径については 3.2 , 混合粒径については 3.6 の方法により求める。図 $4 \cdot 1$ は単一粒径の気乾試料について, 落下高さ $H_R = 12\text{ cm}$ として, 突固め回数を変化させた場合の締固め前後の粒径加積曲線の例である。⁴⁾ 川砂に比してマサ土の粒子破砕が顕著であることを明瞭に示している。

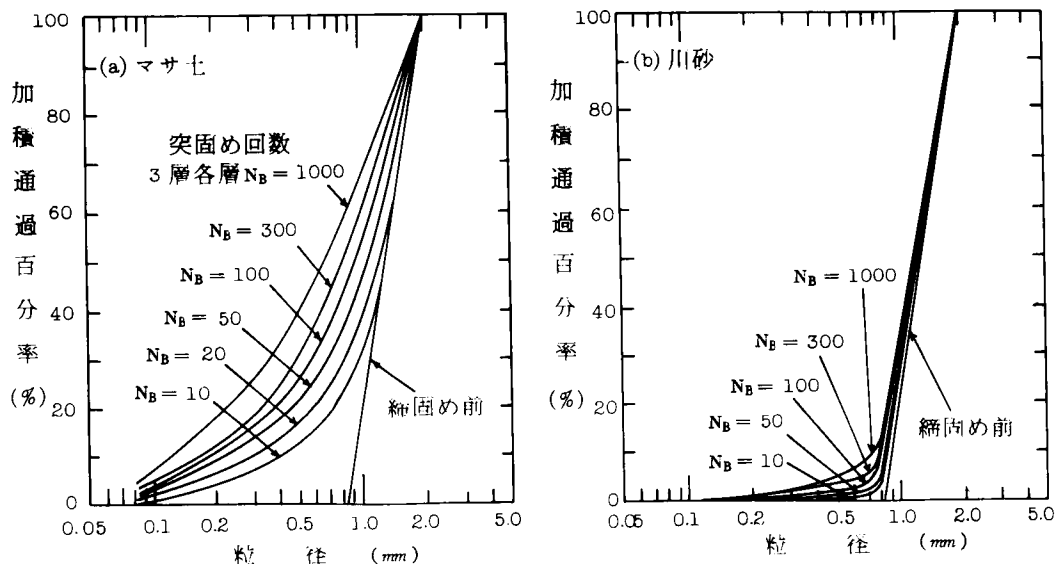


図 $4 \cdot 1$ 突固め前後の粒径加積曲線

一方、混合粒径の破碎性を求めるための較正曲線は3.6において比叡山試料について求めたが、本章で用いた六甲試料についても全く同じ方法を適用できる。図4・2は六甲試料のデータを追加して、図3・14、3・15を書き直したものである。

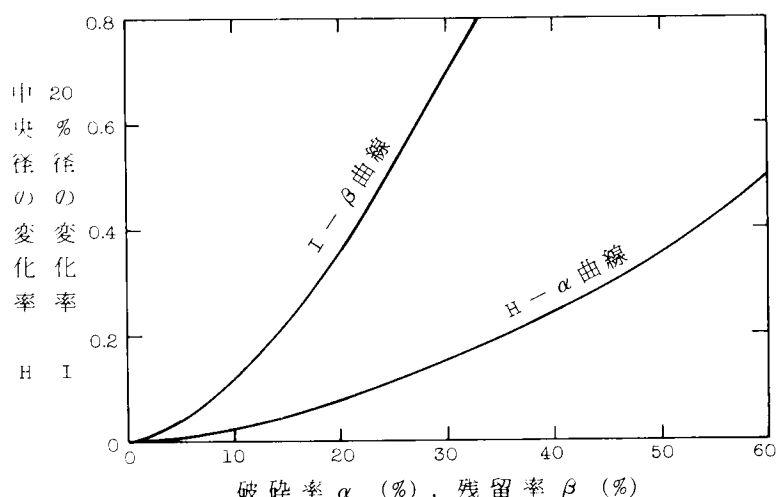


図4・2 較正曲線

4.3 突固め仕事量と土粒子破碎性の関係

風化度の異なる4種類のマサ土の2.00～0.84 mm 試料について、締固め試験を行った結果は図4・3である。仕事量が多くなると破碎率が増し移動率が減少して、破碎の進むことが明らかである。風化度別に比較してみると、風化の進んだマサAが破碎率は大きく移動率が小さく、完全破碎の傾向にある。川砂はほとんど破碎せず、仕事量を増しても破碎率は10%以下である。これに比してマサ土はたとえ未風化のものであっても、仕事量が増すと50%以上の粒子が破碎している。

移動率と風化度の関係は、破碎率の場合にくらべてばらつきが大きい。とくに、移動率が高い場合は破碎粒子が少なく、データーの信頼性に欠けるのはやむをえない。しかしながら、未風化のマサ土の低仕事量の範囲および川砂の破碎が部分破碎であり、風化の進行につれて分割破碎から完全破碎へと進む様子がうかがえる。

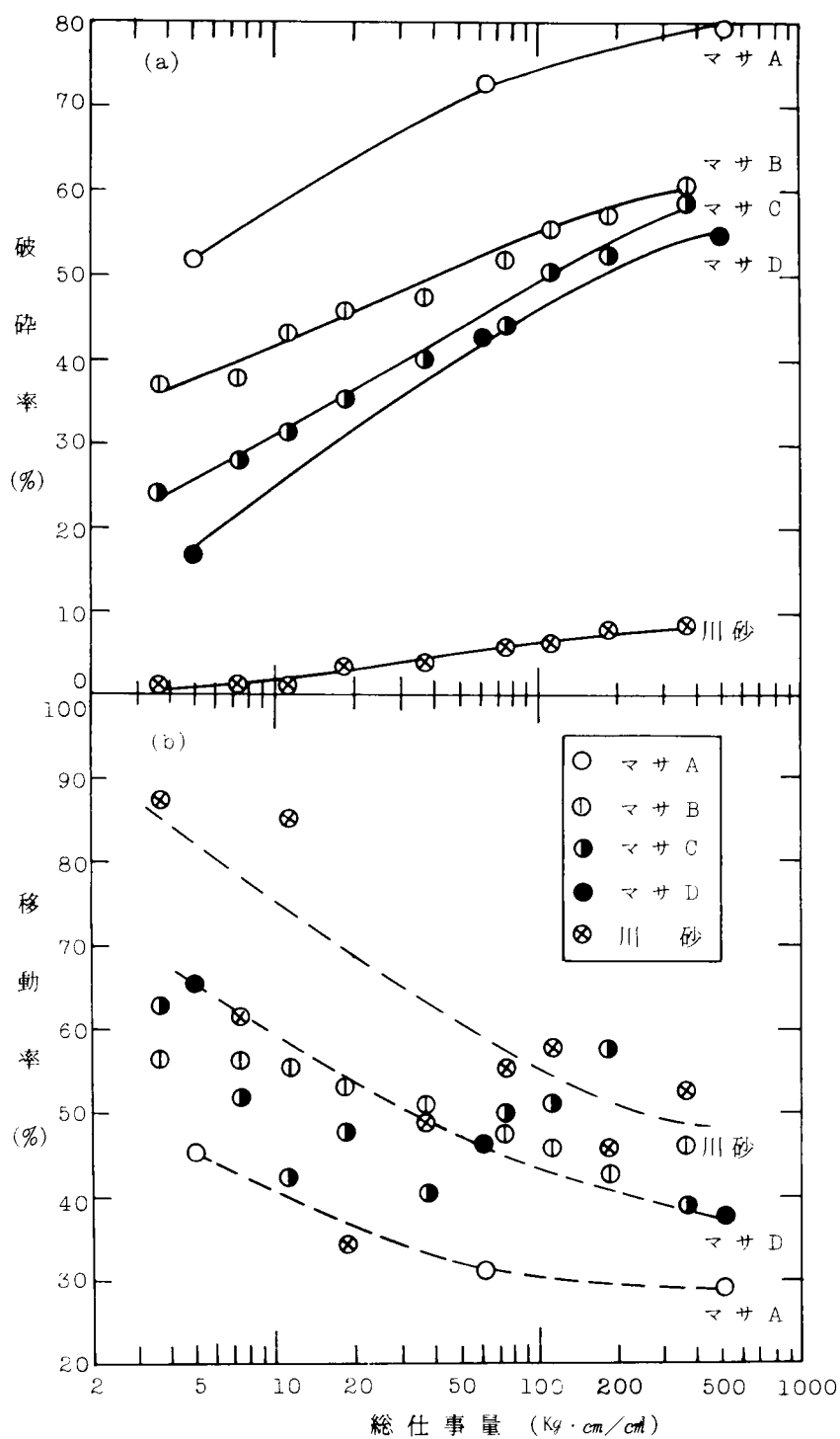


図4・3 突固め総仕事量と破砕性（単一粒径試料）

同じ総仕事量を与えるとしても、ランマー 1 回の打撃仕事量（単位仕事量）の
 大小により、破碎性が異なるかどうかを調べたものが図 4・4 である。

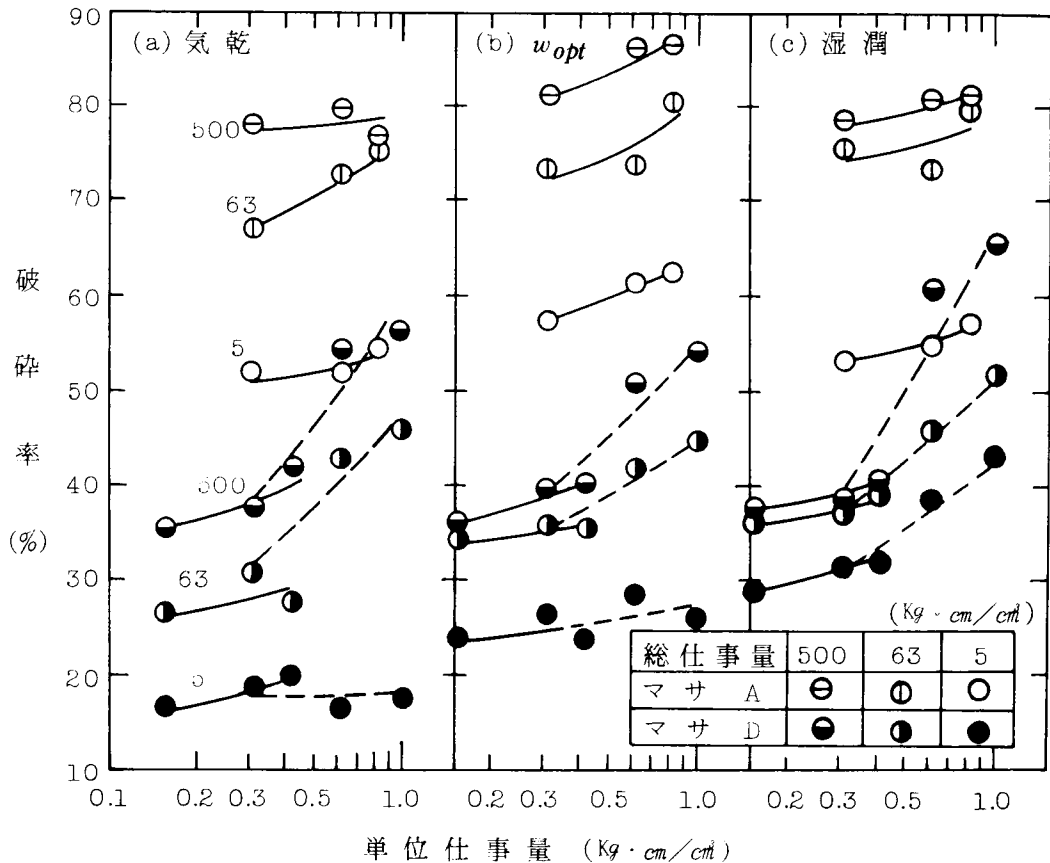


図 4・4 単位仕事量と破碎率の関係

ランマーの重量を一定にして落下高さを変えた場合（図中の実線），単位仕事
 量が増すほど破碎性は大きくなる。強風化のマサ A で総仕事量が大きく破碎性の
 顕著な（破碎率 60 % 以上）場合は，破碎率が単位仕事量の大小にそれほど関係
 しない。また，低風化のマサ D で総仕事量が小さく破碎性が低い（破碎率 30 %
 以下）場合も，単位仕事量の影響は少ない。つまり，破碎性が極端に大きいから
 るいは小さい場合は，1 回当りの仕事量が少々変わろうとも，総仕事量と同じなら
 破碎率はほぼ一定である。

粒子が破砕するには、その粒子の強度と外力との大小関係が問題となる。この場合、外力はランマーにより繰返し与えられることになり、粒子は一種の疲労破壊をしていると考えられる。単位仕事量が小さいことは、粒子の強度より小さい外力を加えることと同じであり、粒子破砕は起りにくい。一方、単位仕事量が多い場合は、粒子の強度に等しいかそれ以上の外力を加える場合と同じであり、ほとんどの粒子が破砕してしまう。

このように考えると、今回実験した単位仕事量の範囲（ $0.1 \sim 1.0 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$ ）では、マサ A には粒子強度以上の外力が働いており、大部分の粒子が破砕している。またマサ D では単位仕事量が粒子強度より小さいため、総仕事量の小さい間は単位仕事量が増しても粒子破砕の増加はみられない。これに対してマサ D で総仕事量の大きい場合には、単位仕事量によって破砕性が決定される。つまり単位仕事量のわずかな変化が粒子の破砕性を増減させることになる。

マサ D の破線はランマー落下高さを一定にして、ランマー重量を変化させた場合であるが、単位仕事量による破砕性の変化は顕著である。これをローラー転圧の場合に適応してみると、総仕事量を一定にしたとしても、重いローラーによる転圧が高い破砕性を与えることを示している。

図 4・5 は試料 B、D および川砂について、粒径 $4.76 \sim 0.074 \text{ mm}$ のものを突固めた結果である。粒径加積曲線からだけでも、粒子破砕の傾向はわかる。この場合、混合粒径試料であるため、図 4・2 を用いて破砕率、移動率を計算したものが図 4・6 である。

風化度の違いによる破砕性の変化は、単一粒径の場合（図 4・3）と同じである。仕事量による破砕性の変化をみると、マサ土については単一粒径（図 4・3）と混合粒径（図 4・6）はよく似た傾向を示しているが、川砂は全く異なった結果である。つまり、混合粒径の川砂は突固め総仕事量の増大に伴い、かなり破砕することになる。しかし、移動率が単一粒径のものに比して極端に小さいことを考えると、この川砂の破砕は粗粒子の部分破砕によるものと考えられる。落下法による破砕性で述べた細粒子の影響が強く現われ、破砕性を高めたものと考えられる。

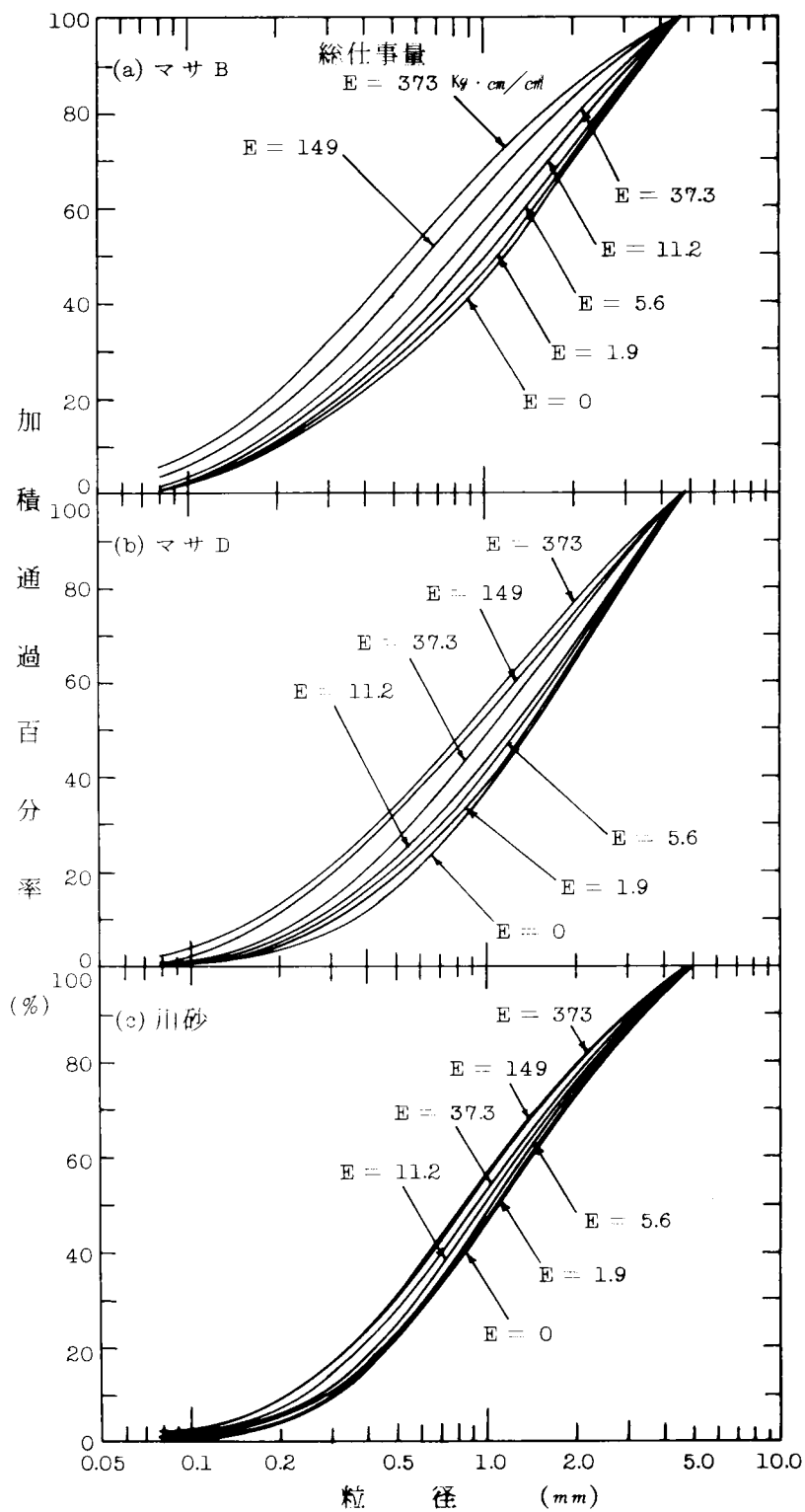


図 4・5 突固めによる粒径の変化

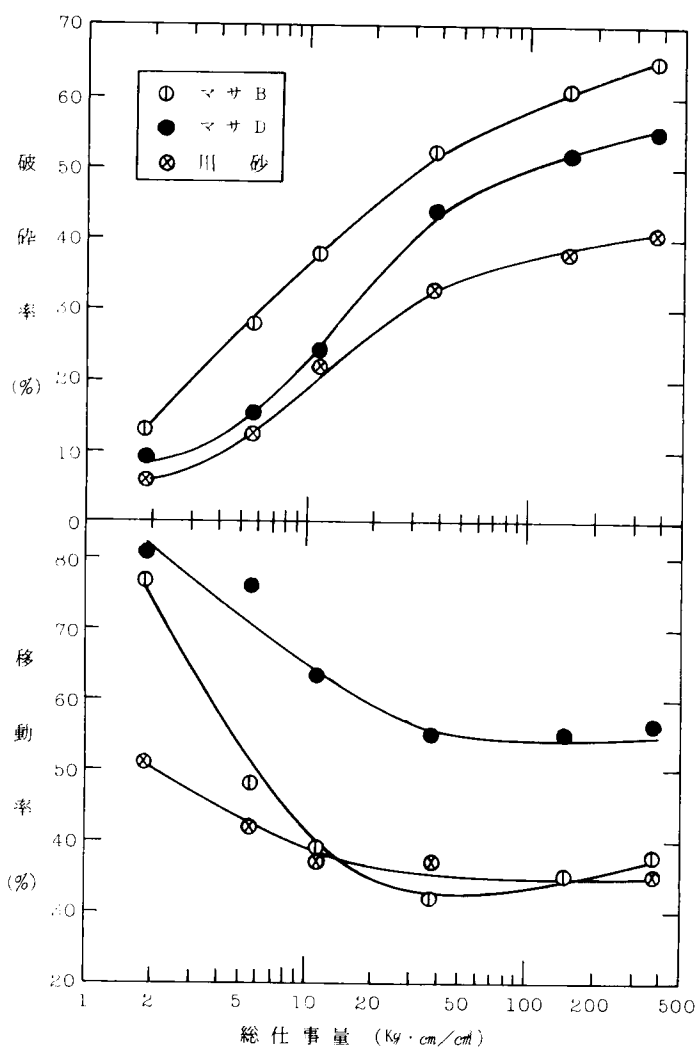


図 4・6 突固め総仕事量と破砕性の関係（混合粒径試料）

一方このマサ試料では、突固め総仕事量 $40 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 以上で移動率がほぼ一定となる。破砕率の増加割合も徐々に小さくなっていることを考えると、これ以上の仕事量ではもはや細粒化は進行しない。表 3・2 により破砕形式を考えてみると、突固め回数が小さく仕事量の小さい間は部分破砕や分割破砕が顕著で、その後完全破砕を起す。仕事量 $40 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ 以上では完全破砕すべき粒子はもはやなく、強度の比較的大きい粒子が部分破砕と分割破砕をするものと考えられる。

4.4 土粒子破碎と締固め特性

4.4.1 含水比と破碎性の関係

図4・4は単位仕事量の違いによる破碎率の変化を示したものであった。この図からは、試料の含水状態の相違による破碎性の変化も読みとれる。すなわち、気乾状態 ($w = 1\%$ 前後)、最適含水比状態 (マサ A では $w_{opt} = 14.5\%$ 、マサ D では $w_{opt} = 11\%$ 付近)、湿潤状態 ($w = 30\%$ 付近) の三者について締固めを行った結果である。最適含水比付近でもっとも破碎性が大きいことがわかる。

図4・7は、単位仕事量 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}$ の場合の破碎率と移動率を示している。低破碎状態を除いて、最適含水比における破碎性、細粒化が大きいことを示している。これらの試料はすべて単一粒径のものであり、密度を最大にするためには適度の細粒子が必要となる。この意味からも、最適含水比付近で破碎性が最大となる理由がある。

また、乾燥状態よりも湿潤状態の方が、破碎性の大きい結果を示しているが、粒子の水浸に伴う弱体化を表わしているものである。

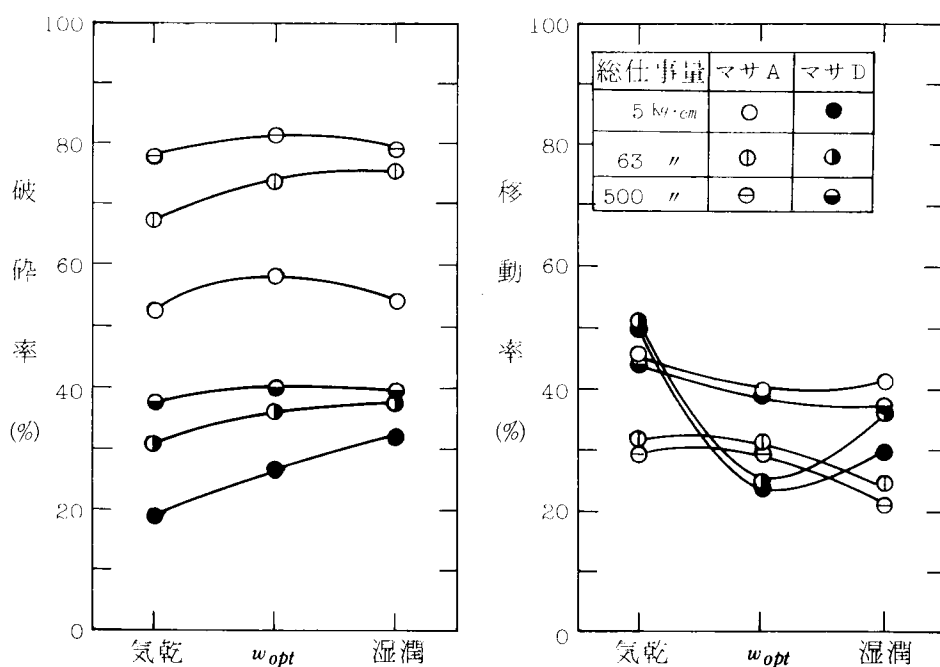


図4・7 含水比と破碎性

最適含水比付近の破碎性について、2.00～0.84 mmのマサ A について実験した結果が図 4・8 である。風化の進んだマサ土の場合、最適含水比よりわずかに湿潤側で最大の破碎性を示す。土粒子の間隙に入った水によって土粒子がはぐれて破碎しやすく、かつ細粒化しやすくなったものと考えられる。さらに水量が増えると逆に破碎率が減少する。これは、過剰の水分により土粒子が動きやすくなったために、粒子と粒子の接触が少なくなり、乾燥密度が減少するとともに、粒子破碎も起らなくなるものと考えられる。

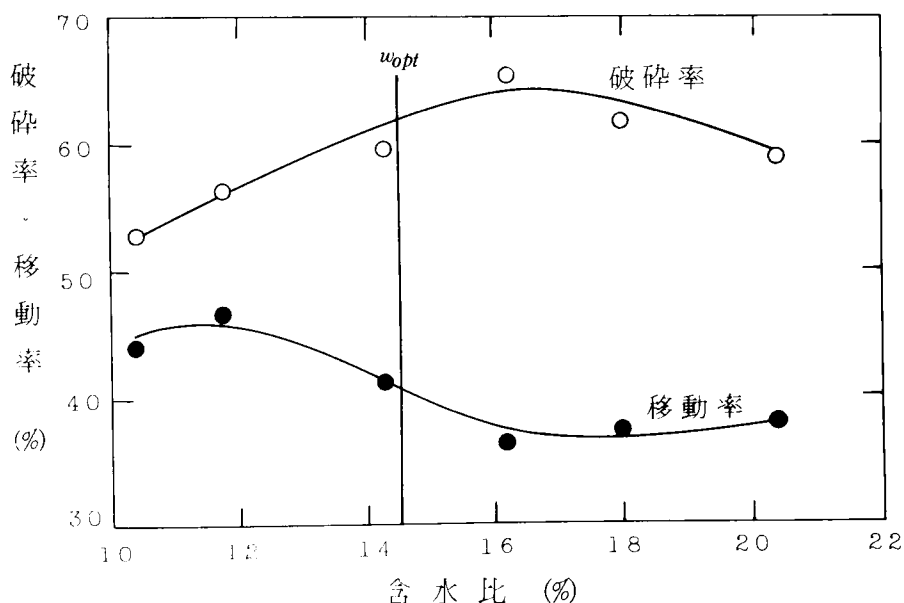


図 4・8 最適含水比付近の破碎性

一方、図 4・9 は 4.76 mm 以下の粒子をすべて含んだマサ B、D および川砂の締固め試験結果である。⁶⁾ 最適含水比はマサ B が 11.5%，マサ D、川砂が 10.5% である。最大乾燥密度は、風化の進んだものほど小さい。これに対して、破碎率のピークは、マサ B の場合、最適含水比より少し大きい 12.5% 付近である。また、マサ D および川砂は、8～9% 付近で破碎率のピークを示し、最適含水比よりわずかに低いところである。

さらに、移動率の変化をみると、マサ B は移動率が小さく 45～40% とほぼ一定である。含水比の増大につれて破碎が起り、かつ細粒化も顕著であることから、土粒子の間隙に入った水により土粒子がはぐれて、完全破碎を起し

ていると考えられる。風化に伴う土粒子の脆弱化により、乾燥密度が小さく、破砕性が大きいため、最適含水比より湿潤側で破砕性が最大となる。一方、マサDは含水比の低いときには移動率が大きく細粒化が起らない。つまり、破砕形式は分割破砕である。含水比の増大につれて細粒化の傾向が増し、完全破砕に近づき、密度も増大する。川砂については破砕率が最高でも13%くらいで小さく、これに比して移動率の大きいことから、部分破砕をしているものと考えられる。川砂や、マサDのように比較的粒子が堅固なものでは、最大乾燥密度が生じるより低い含水比で最大の破砕率を示すことに注目すべきである。

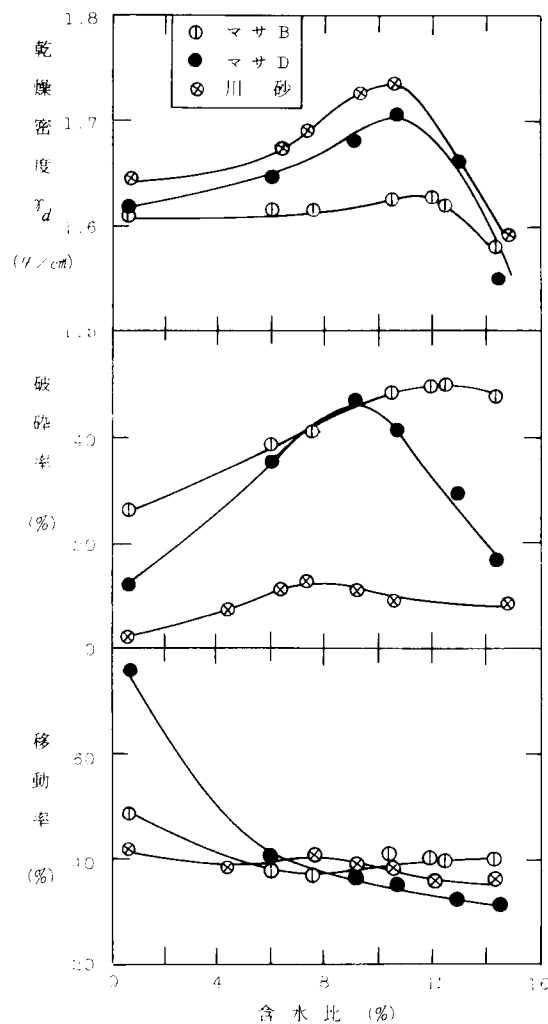


図4・9 最適含水比付近の破砕性

4.4.2 密度と破碎性の関係⁶⁾

締固め試験において、ランマーにより加えられる総仕事は、土を圧縮して密度を高める締固め仕事と土粒子を破碎する破碎仕事に分けることができる。締固め仕事は土の密度増加すなわち乾燥密度により表わされ、破碎仕事は破碎率で表わされと考える。

図4・10は、マサAの単一粒径試料(2.00～0.84mm)について、突固め総仕事量を増加させた場合の乾燥密度と破碎性の関係を示している。

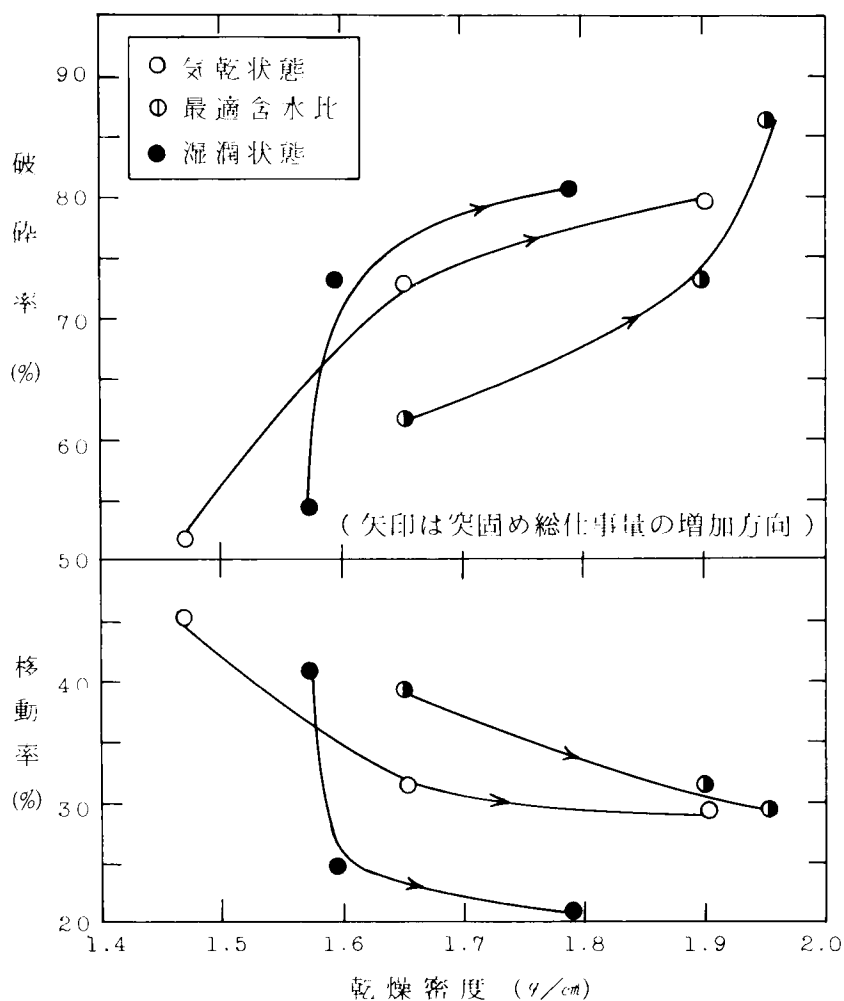


図4・10 突固め総仕事量の変化に伴う乾燥密度と破碎性の関係(その1)

湿潤試料では、総仕事量が小さいとき、密度は上昇せずに破砕率が増加し、移動率が減少する。ついで総仕事量が大きくなると高密度化が生じる。すなわち、突固め総仕事量の中で、粒子破砕に使われる仕事量と密度増大に使われる仕事量が明瞭に分かれている。

一方最適含水比状態の試料では、湿潤状態の試料と反対に、初めに密度増大をもたらす仕事量がなされ、その後粒子破砕の仕事が行われるようである。気乾状態試料はその中間の位置にある。

このように乾燥密度を横軸にとり、破砕性を縦軸にとってデーターをプロットすると、加えられる総仕事量の中で粒子破砕と密度増大に使われる仕事量の分担割合を推定できる。

混合粒径試料に同様の整理を行ったものが図 4・11 である。

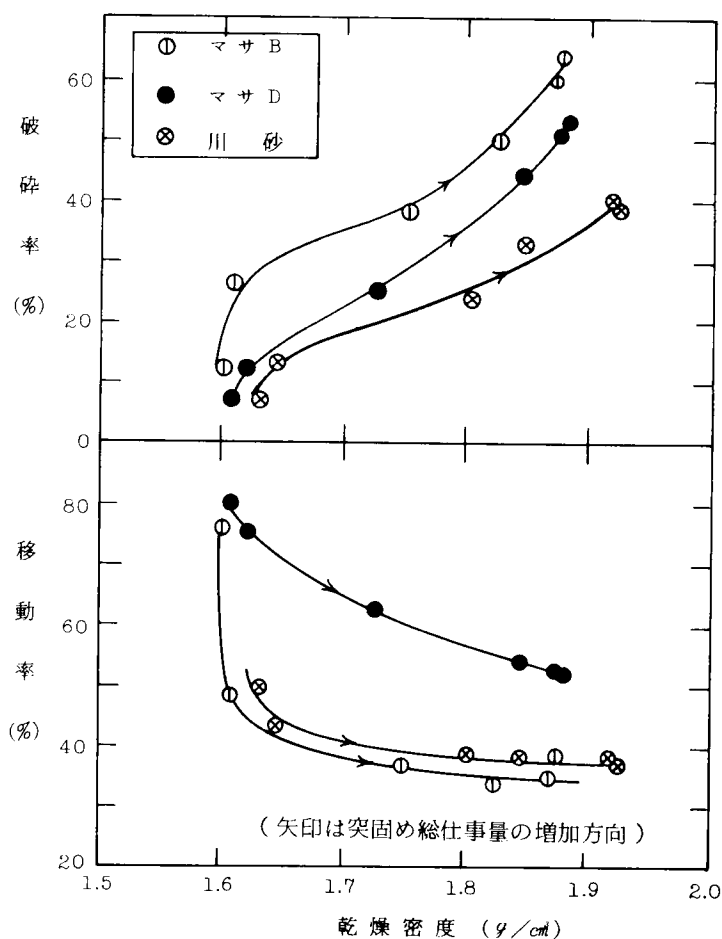


図 4・11 突固め総仕事量の変化に伴う乾燥密度と破砕性の関係(その 2)

風化の進んでいるマサ B は、突固め総仕事量の小さい場合、土粒子破碎の仕事が顕著で、弱い粒子を破碎し細粒化していく様子がわかる。総仕事量を増していくと密度増大の仕事が発揮される。一方、未風化のマサ D は、総仕事量の小さいうちから高密度化が行われる。川砂についてはこの傾向がさらに著しい。

図 4・12 は含水比を変化させたときの乾燥密度と破碎性の関係を示している。図中、マサ A は単一粒径 ($2.00 \sim 0.84 \text{ mm}$) であり、他の三者は混合粒径 (4.76 mm 以下) である。また、突固め総仕事量は約 $5 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$ と一定である。

単一粒径試料の場合、高い破碎性を示すにもかかわらず、乾燥密度は低いことがわかる。風化の極端に進んだマサ A であることも原因となっている。

各曲線のループの方向は最大破碎率を示す含水比と最適含水比との関係を決めるものである。すなわち、風化の進んだマサ A、B では最適含水比より湿潤側で最大破碎率を示すためループは左回りとなる。一方、未風化のマサ D や川砂ではループが右回りであり、最適含水比の乾燥側で破碎率がピークとなる。

混合粒径試料の三者を比較すると、風化度の順に並んでいる。最適含水比の乾燥側において含水比が増大するにつれて、マサ B は粒子破碎の仕事割合が増える傾向にある。マサ D は高密度化、粒子破碎の両者が比例的に増大している。川砂では密度増大に消費される仕事割合が多い。これらのことは、すべて、風化に伴う粒子の弱体化、細粒化により説明できる。つまり、風化が進み細粒分の多いマサ B では、土中の水分の増大とともに破碎した細粒子が増加しすぎて密度上昇に寄与しえない。また、粒子の比重が低いこともこの原因となっている。最適含水比より湿潤側では三試料ともに密度が減少していき、破碎率も徐々に減少する。すなわち、総仕事量の中で締固めや土粒子破碎が占める仕事量は最適含水比付近が最大となる。

一方、細粒化は含水比の変化に伴い減少する方向であり、その中でも最適含水比の前後で変化がはげしい。つまり、最適含水比の乾燥側と湿潤側ではっきりと移動率の違いが現われている。すなわち、細粒化は土中の水分に影響を受け、乾燥状態より湿潤状態の方が細粒化しやすいことがわかる。

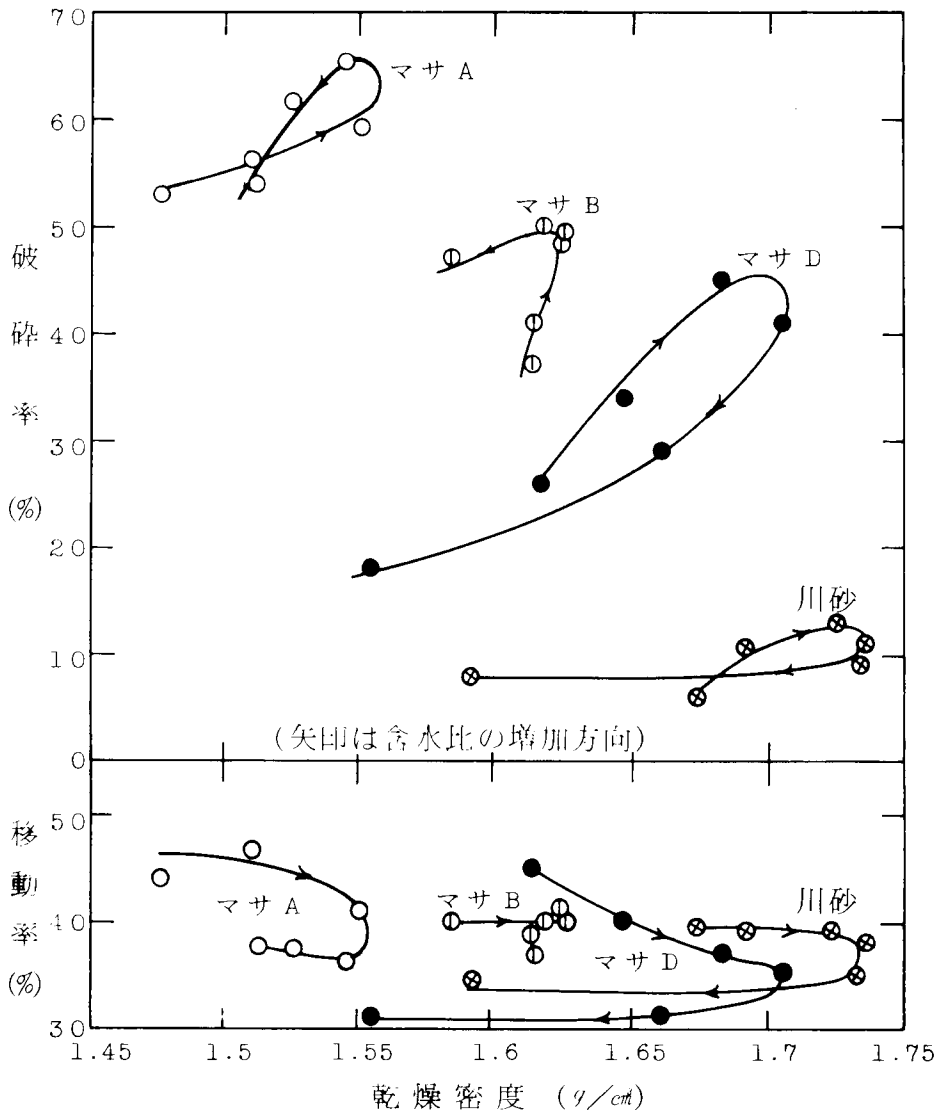


図 4・12 含水比の変化に伴う乾燥密度と破砕性の関係

4.5 結 語

突固めによる締固め試験におけるマサ土粒子の破砕状態を実験的に研究したところ、つぎのような結論を得た。

- (1) 突固め総仕事量の増加とともに土粒子の破砕性は増加する。風化の進んだマサ土は完全破砕を示す。末風化のマサ土でも仕事量を大きくすると半分以上

の粒子が破碎するが、川砂の破碎率は10%以下である。

(2) 破碎率が30%以下の低破碎状態と60%以上の高破碎状態では単位仕事量に変化しても、総仕事量が同じなら、破碎率はほぼ一定である。これに対して、破碎率30～70%の状態は単位仕事量の大きさにより破碎性が影響される。すなわち、総仕事量が同じでも重いローラによる転圧が高い破碎性を与えることになる。

(3) 今回用いたマサ土試料では突固め総仕事量40 kg·cm/cm²以上でもはや細粒化は進行しない。

(4) 粒子破碎は最適含水比(w_{opt})付近がもっとも顕著であり、風化の進んだマサ土は w_{opt} よりわずかに湿潤側で最大の破碎率を示す。一方、未風化のマサ土や川砂は w_{opt} よりわずかに乾燥側で最大の破碎率となる。これは乾燥密度－破碎率図上での曲線のループの方向で明確となる。

(5) 風化の進んだマサ土では高い破碎率を示すが、密度は増大しない。これは粒子の弱体化による土粒子比重の減少および細粒分過多が原因である。

参 考 文 献

- 1) 谷本喜一，岩崎照昌，西勝，藤吉芳男：突固めによる土粒子の破碎について，第7回道路会議論文集，pp.258～260，1963.
- 2) 久保田敬一，佐藤忠信：突固めによる土粒子の破碎について，第22回土木学会年次学術講演会概要集（第3部），pp.87-1～87-2，1967.
- 3) 福本武明：締固めたマサ土の密度に関する粒子破碎の影響，土質工学会論文報告集，Vol.12，No.3，pp.55～63，1972.
- 4) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土の締固め時の土粒子破碎について，第12回土質工学研究発表会講演集，pp.501～504，1977.
- 5) 松尾新一郎，澤孝平：締固めエネルギーとマサ土粒子の破碎性の関係について，第13回土質工学研究発表会講演集，pp.629～632，1978.
- 6) 松尾新一郎，澤孝平：マサ土の突固め試験における土粒子破碎について，第10回土質工学研究発表会講演集，pp.369～372，1975.

第5章 マサ土の石灰安定処理における土粒子破碎の影響に関する研究

5.1 概 説

石灰が建設用の材料として使用された歴史は極めて古いが、近年では1802年にフランスにおいて粘土と混合してグラウトとして用いられ、1920年代にはアメリカで初めて道路建設に使用された。1950年前後からアメリカでは、道路や滑走路の路盤の安定処理に使われ、その後世界各地に普及した。わが国では、昭和30年代に道路・鉄道の路盤の土質安定工法として用いられ、研究が行われた。とくに関東ローム、シラス、ヨナなどの安定処理に有効なことが明らかにされた。そして、昭和40年代に入ると、石灰パイル工法や注人工法によって、深層の地盤も改良されるようになってきた。

石灰を用いた安定処理の対象は主として粘性土であり、最近の特許を調べてみてもその90%以上は粘土、ヘドロ、ロームを対象としたものである。ところで、マサ土は、風化程度および母岩の相違により若干の例外はあるが、一般に砂質土に属する。したがって、これを石灰で安定処理することは、あまり考えられていないようである。しかし、わが国で古くから行われている二和土、三和土という石灰と土による構造物では、マサ土のような砂質土が用いられている。また、山砂などには、ソイルセメントに代って、石灰安定処理が採用された例もある。¹⁾

マサ土の石灰安定処理に関する研究としては、松尾・宋が行った一連のものが特筆される。彼らは比較的風化の進んだマサ土を用いて、処理土の工学的性質ならびに微視的な研究を行い、マサ土の石灰安定処理工法の有効性を明らかにしている。²⁾

一般に土と石灰との反応原理は、次の四つである。

(1) イオン交換反応

土と石灰の混合により土粒子表面のイオンと石灰のカルシウムイオンとのイオン交換が行われ、粒子間の電荷密度が変化し、粒子と粒子が引きつけやすくなり土全体が凝集化される。この反応は早ければ数日のうちに終了する。

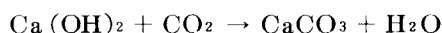
(2) ポゾラン反応

イオン交換を終えた石灰が土粒子中の Al_2O_3 （アルミナ）や SiO_2 （シリカ）と反応し、トーマライトなどのけい酸カルシウム水和物、 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ （アルミン酸カルシウム水和物）、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ （加水ゲーレンナイト）のような水和生成物を生じ、土粒子を結合固化する。

(3) 炭酸化反応

土と混合した石灰が、空中あるいは水中の炭酸ガスと反応して CaCO_3 （炭酸カルシウム）となり固結する。その反応率は、炭酸化反応の程度を示すもので、養生後の重量増加量がすべて炭酸化反応に基づく重量増加量と仮定し、添加した石灰量の何パーセントが炭酸化したかを表わすものである。計算方法はつぎのとおりである。³⁾

消石灰を添加した処理土の化学反応式は、



分子量	74.1	44	100.1	18
-----	------	----	-------	----

ゆえに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が CaCO_3 を生成するのに1モル当たり26グラムの重量増加がある。処理土中の石灰が全部反応して CaCO_3 になったとすると、その重量増加量 ΔW (g)は、

$$\Delta W = W_l \times \frac{26.0}{74.1} \quad (5.1)$$

ここに、 W_l ：供試体中の消石灰重量(g)

ゆえに、作成時および所定日数養生後の供試体の乾燥重量がわかると、石灰反応率 P (%)は、

$$P = \frac{W_2 - W_1}{\Delta W} \times 100 \quad (5.2)$$

ここに、 W_1 ：作成時の供試体乾燥重量(g)

W_2 ：所定日数養生後の供試体乾燥重量(g)

(4) 発熱・体積膨張作用

生石灰は土中の水分と反応して発熱し、含水比を低下させ、また、体積膨張して土の密度を高める。

以上が主な反応であるが、細粒分量の多い土、中でもアロフェン、モンモリ

ロナイトや加水ハロイサイトなどの粘土鉱物を多く含む土においては、ポズラン反応が顕著に現われる。そして、この反応は時間経過とともに長期にわたって強度を増大させるので、石灰安定処理の反応原理としては、もっとも代表的なものである。一方、粘土質の少ないマサ土のような砂質土においては、炭酸化反応が強度発現に大きく関係しているとされている。

このように石灰と土との反応を考えると、土中の細粒子が問題となる。そこで、前章までに明らかにしたマサ土粒子の破碎性に着目する。粒子が破碎するとマサ土中には細粒子が増加する。この細粒子が石灰と反応すれば、マサ土の安定処理は確実にその効果を期待できることになる。本章では、マサ土中の細粒子と石灰との反応を通じて、マサ土の石灰安定処理の可能性を追究する。^{4) 5)}

5.2 試料および実験方法

実験に用いた試料は、六甲山系横尾山より採取したマサ土である。また、強度発現の比較のために掛保川産の川砂を用いた。これらの試料の性質は表5・1に示すとおりである。

表5・1 試料の性質

性 質	マサ土	川 砂
比 重	2.59	2.67
み かけ 比 重	2.49	—
強 熱 減 量 (%)	2.1	1.7
均 等 係 数	6.4	4.8
74 μ 以下含有率 (%)	0.4	0.8

風化度の判定指標にはみかけ比重と強熱減量を用いた。本試料は第4章で用いた試料Cと同じであり、あまり風化は進んでいない。

試料はすべて4.76 mm ふるい通過分を用い、石灰としては消石灰を用いた。供試体作成は、ハーバード式小型締固め試験機により行った。モールドは直径3.33 cm、高さ7.14 cm で、ランマーは重さ620 gのものを高さ15 cmより3層13回

ずつ自然落下させて締固めた。これは、締固め仕事量が JIS A 1210 の呼び名 1.1 法と同じものである。供試体はマサ土中の細粒子（ここでは 74μ 以下の粒子をいう）の質と量を変えて作成した。これら供試体を表 5・2 に分類して示した。なお、供試体 F は密度の異なるもので、締固めエネルギーが異なる。図 5・1 はこれら供試体作成土の粒径加積曲線である。なお、供試体 E, F, G の試料は供試体 D-2 あるいは D-1 と同じである。図 5・2 は代表的な供試体の締固め曲線である。これによると、最適含水比は石灰添加量、細粒分量にほとんど影響されないため、供試体作成は含水比 15% で行った。

石灰安定処理の効果は処理土の一軸圧縮強度により表わす。

表 5・2 石灰安定処理の供試体

記 号	試 料	破碎方法	細粒分量(%)	石灰添加量(%)	養生方法・その他
A-1	マサ土	未破碎	0.4	0, 10, 20, 30	室温の湿潤箱内
2	川 砂		0.8		
B-1	} マサ土 } 川 砂	落下法	6		
2			9		
3			2		
4			6		
C	マサ土	ロサンゼ ルス試験 機による 方法	19.6	30	室温の気乾 40°C, 95%以上の湿潤箱内
D-1			10	10, 20, 30	室温の気乾 室温の湿潤箱内
2			20		
3			30		
E-1			20	30	室温の気乾 { 細粒子分の質がそれ ぞれ異なる。(注 1)
2			20	30	室温の気乾 供試体乾 室温の湿潤箱内 爆密度 $r_d = \begin{cases} 1.8 \\ 1.7 \\ 1.6 \end{cases}$ (g/cm^3)
3					
G-1			10	10	(フライアッシュ添加) 室温気乾 25°C, 95%以上の恒温恒湿槽内
2			20		

注 1) E-1 : 原土中の細粒子をふるい分けて、細粒分量を 20% に調整したもの。
E-2 : 原土を 74μ ふるいで水洗いして得た細粒子を 20% だけ粗粒分に加えたもの。
E-3 : 水洗いして 74μ ふるいに残留した粗粒子を破碎させて 74μ 以下とし、これを 20% だけ粗粒分に加えたもの。
E-4 : 沖積粘土の 74μ ふるい通過分を 20% だけ粗粒分に加えたもの。

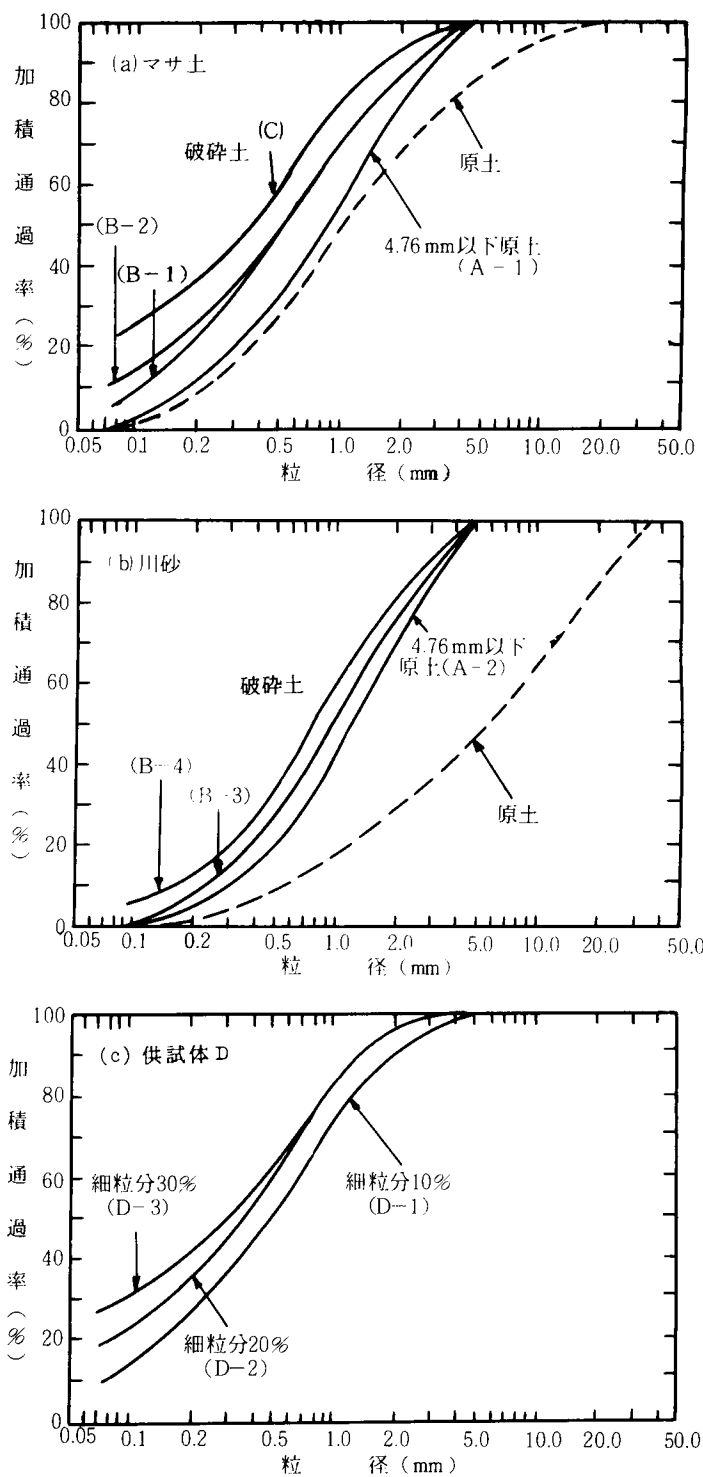


図5・1 供試体の粒径加積曲線

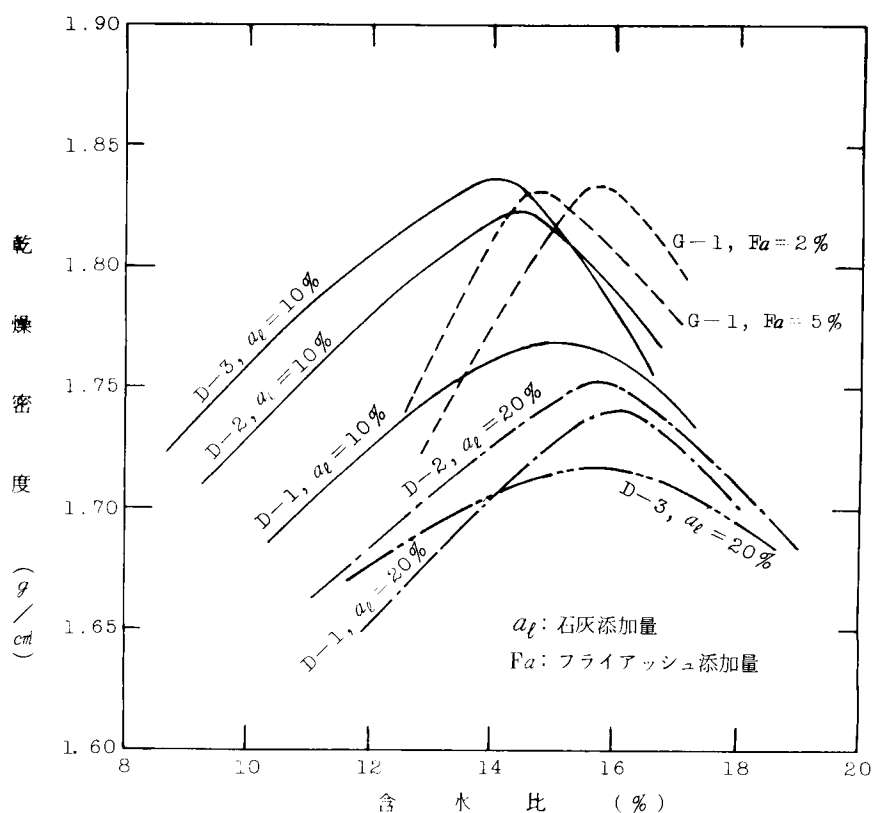


図5・2 試料土の締固め曲線

5.3 土粒子破碎による安定処理効果

5.3.1 未破碎および低破碎試料土の安定処理⁶⁾

図5・3(a)は破碎をしていない供試体Aについて、石灰添加量0%, 10% および30%の一軸圧縮強度を養生日数ごとにプロットしたものである。マサ土、川砂ともに石灰添加により強度が増加することは明らかであるが、強度の値は予想したほど高くない。砂質系の土の石灰との反応がおもに炭酸化であるとするならば、化学反応式からは細粒子には無関係のはずである。しかしながら、炭酸化反応でも、また他の反応においても、反応生成物と土中の細粒子の結びつきが強度発現に関係すると考えられる。そこで、第3章で示した落下法により土粒子を破碎させ細粒分量を増した供試体Bについて、実験を行った結

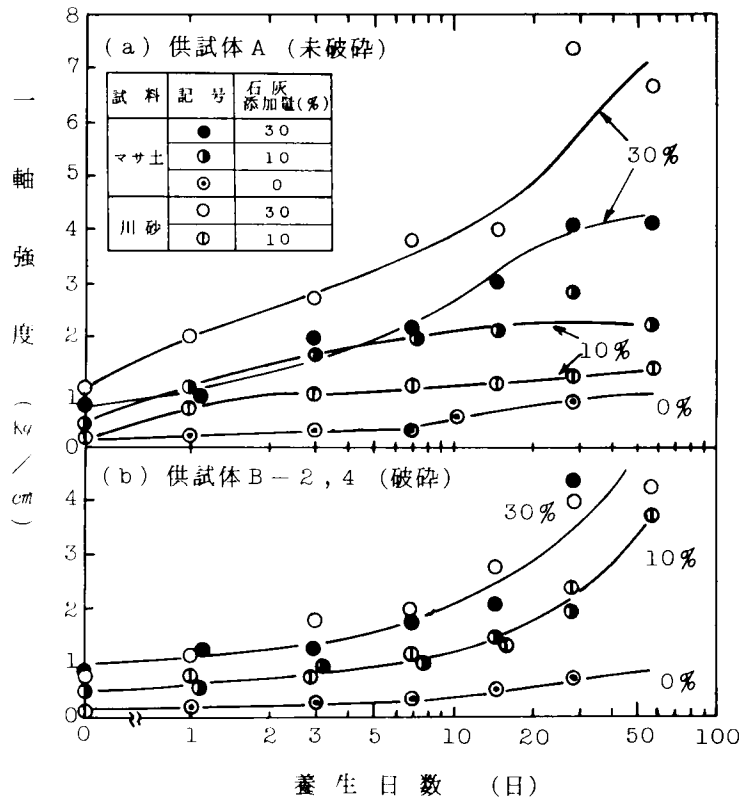


図5・3 石灰安定処理土の養生に伴う強度変化

果が図5・3(b)である。細粒分量が川砂で6%，マサ土で9%になったにもかかわらず，強度はほとんど増加していない。

図5・4はマサ土中の細粒分量と安定処理土の7日，28日養生後の強度を示した。この図によると，初期強度（7日強度）は細粒分量の多い供試体ほど減少する傾向にある。一方，長期強度（28日強度）は，若干ではあるが増加している。すなわち，細粒分量が増えるほど，徐々に石灰－土の反応が起り，強度増大をもたらすと考えられる。

しかし，細粒分量を増加させたにもかかわらず，強度増大がごくわずかであるのは，このマサ土の風化度が小さく，粘土化している部分が少ないことに関係している。

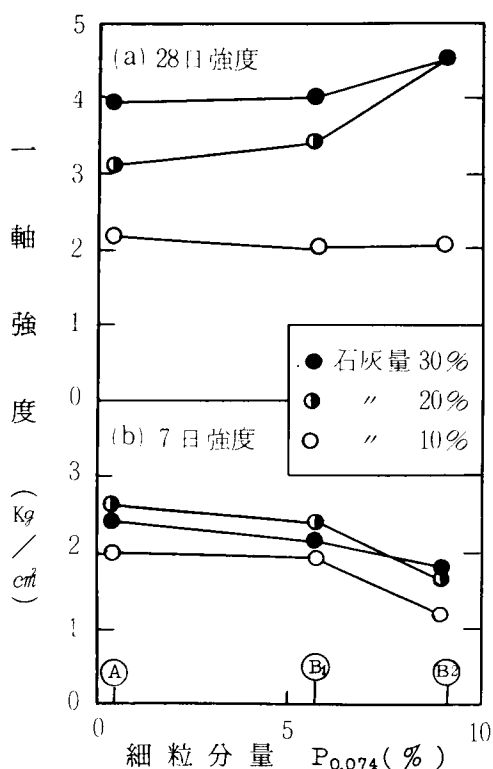


図5・4 マサ土の粒子破碎に伴う強度の変化

5.3.2 高破碎試料土の安定処理⁷⁾

図5・5はロサンゼルス試験機を用いて土粒子を破碎させた供試体Cの養生日数に対する一軸強度をプロットしたものである。供試体Cは細粒分量が19.6%で供試体Bの約2倍であり、一軸強度は供試体Bの約4倍の値となっている。

石灰の炭酸化反応を示す指標である石灰反応率(式5・2参照)を養生日数とともにプロットすると図5・6のようになる。養生日数の初期にはあまり反応が進まないが、10日過ぎから急に上昇する。図5・5と重ね合わせて考えると、炭酸化反応と強度増大が密接に関係していることがわかる。

このことを電子顕微鏡写真で示すと以下のようである。⁴⁾

写真5・1は細粒分量20%の成形していないマサ土の電子顕微鏡写真であるが、これによると風化の程度が小さいためか、粘土鉱物はみあたらない。写真5・2は石灰無添加のマサ土供試体で、1年養生後のものである。写真5・1とあまり変らない。粒子間には間隙が多く存在し、粒子は互いに点や線で接触

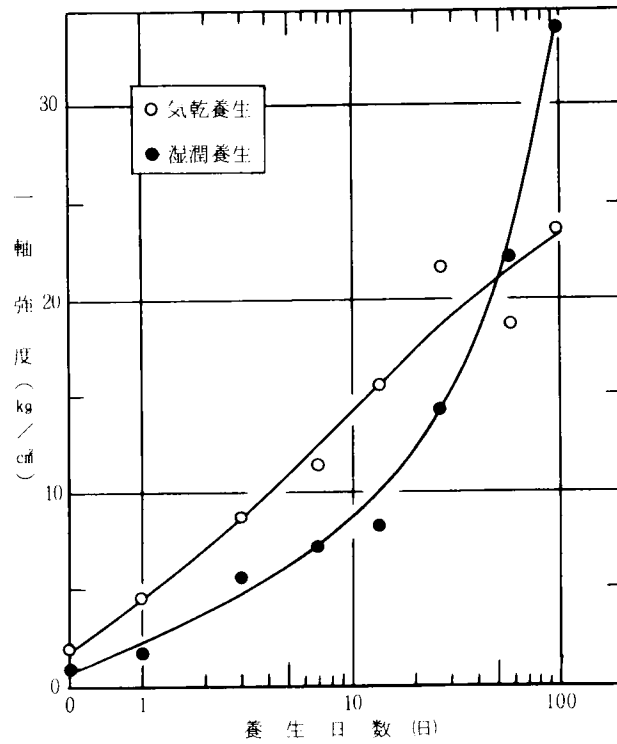


図5・5 高破碎試料の養生日数に対する強度変化

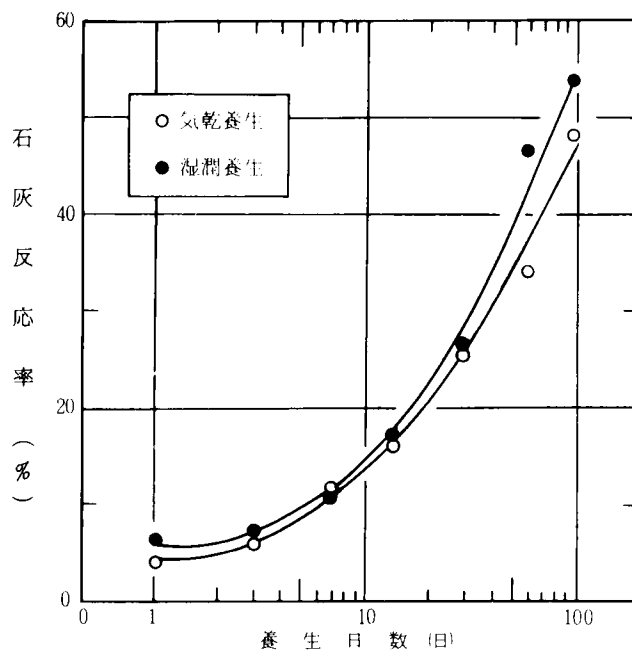


図5・6 高破碎試料の養生日数に対する石灰反応率

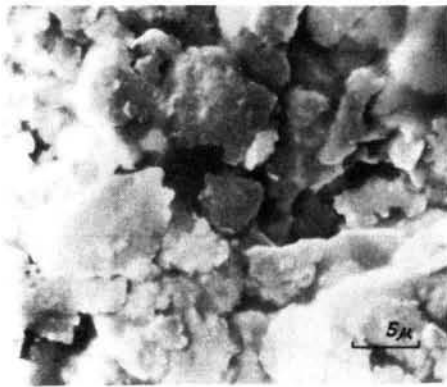


写真5・1 未成形のマサ土粒子

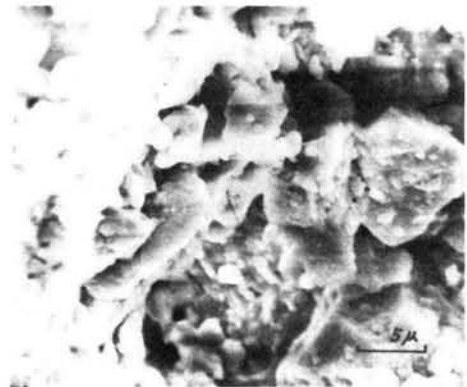


写真5・2 石灰無添加のマサ土供試体



写真5・3 低安定処理効果の供試体

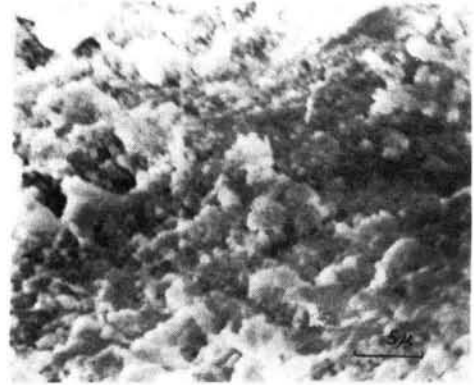


写真5・4 高安定処理効果の供試体

している。その結果、強度試験においてひずみ量は増大し、強度は小さい。

写真5・3、5・4は、細粒分量20%の試料に石灰を10、30%添加した供試体の養生後のものである。写真5・3では土粒子の表面や間隙の一部に密着された石灰反応生成物がみえる。これらは土粒子表面に付着したゲル状石灰が強アルカリにより土粒子内部まで食い込み、水和反応を起して土粒子と土粒子の間を埋め固着させる。また写真5・4では土粒子表面は完全に石灰反応生成物によって被覆され、点と線との接触から面接触となり、全体で1つのマトリックスを形成し、固化することにより強度が大きくなる。ただし写真5・3と写真5・4が石灰添加量10%と30%に対応しているのではなく、石灰

および水分の供試体中での分布程度により種々の反応をしている。一般に石灰添加量 30 % では 10 % に比べて写真 5・3 より写真 5・4 の状態が多いという意味である。

以上の結果、破碎性を高めたことにより、初期においては土粒子の団粒化、高密度化が起り、また炭酸化反応を主とするその他の反応により、長期にわたっても強度増加が進むものと考えられる。すなわち、マサ土中の細粒分の量が多いほど、石灰安定処理土の効果が大きいことがわかる。

一方、図 5・5 からは養生方法と強度の関係を知ることができる。⁴⁾ 図 5・5 によると、気乾養生の方が湿潤養生より早く強度が現われるが、長期的には湿潤養生の方が大きい強度を示す傾向にある。これを図 5・6 の炭酸化反応の反応率で比較してみると、長期的にはわずかながら湿潤状態で養生する方が高い値を示している。

図 5・7 は養生条件の違いによる含水比の変化を示した。これによると、気乾養生は約一週間で含水比が 1 % 以下になっている。初期の乾燥および湿潤養生の強度の違いは、この含水比の変化の相違に基づくものである。すなわち、

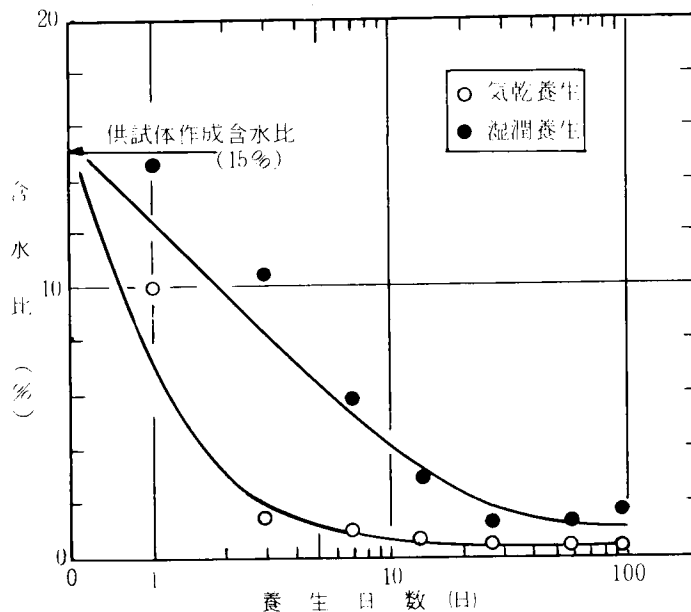


図 5・7 含水比の変化

含水比の急激な減少は短期強度を急速に増大させるが、長期的には強度増大の程度は鈍化することが明らかである。

5.4 細粒分の量および質による安定処理効果

5.4.1 細粒分の量と安定処理効果⁸⁾

ロサンゼルス試験機により破碎した細粒子をマサ土の粗粒分に加えて細粒分量を調整した供試体Dについて安定処理効果を考える。細粒分量は正確には11.2%，19.8%，27.9%の三種類である。ここでは便宜上、細粒分量10%，20%，30%として取扱う。

これら三種の土に消石灰を10，20，30%添加して、養生（気乾および湿潤箱）した後の一軸強度は図5・8のようである。

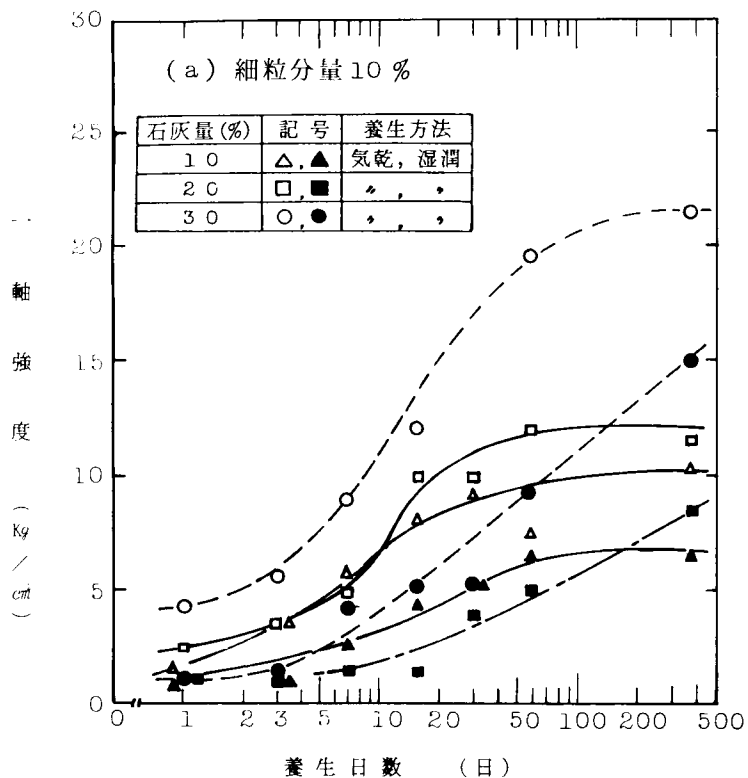


図5・8 養生日数と一軸強度（供試体D）

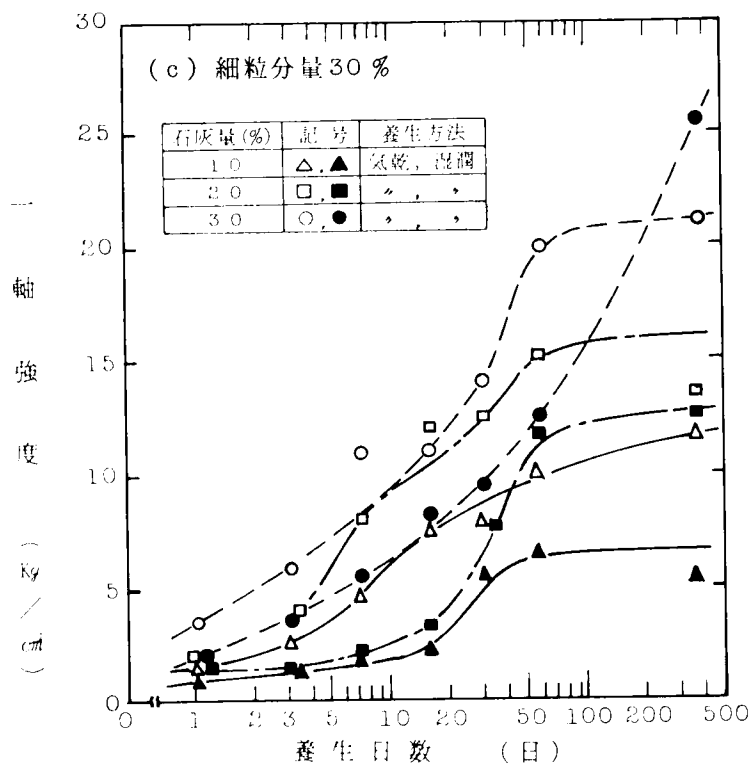
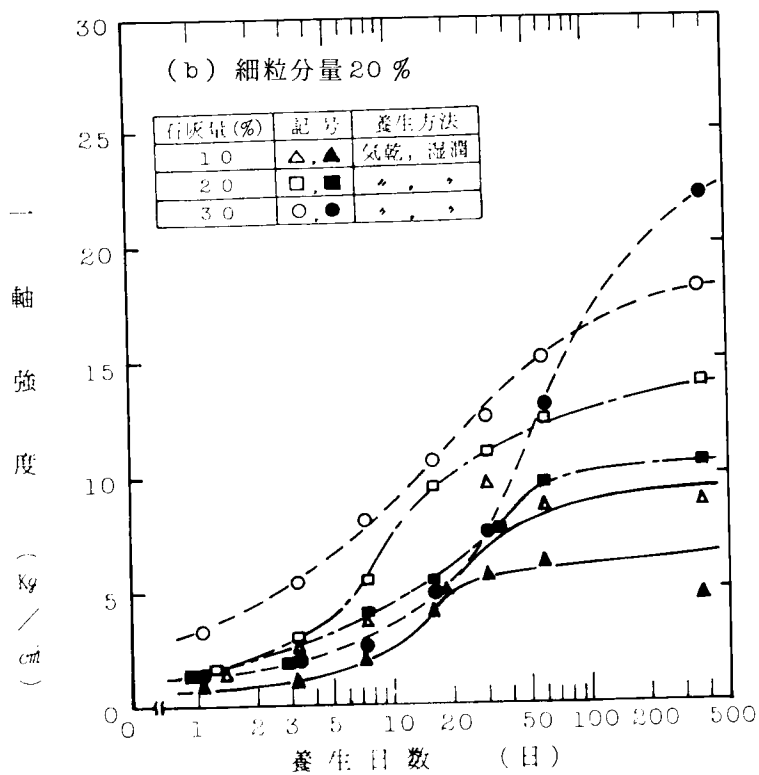


図5・8(続き) 養生日数と一軸強度(供試体D)

これらの図は図 5・5 とよく似た傾向を示している。すなわち、石灰添加量の多いものほど高い強度を示す。また、養生初期では気乾養生の方が大きい強度であるが、長期養生になると湿潤養生がすぐれている。図 5・5 と図 5・8(b) は細粒分量がほぼ同じであるが、養生方法のうちとくに湿潤養生の温度が異なる。養生温度の高い供試体 C (図 5・5) の方が大きな強度を与えていることは注目すべきである。消石灰の場合、標準養生温度より高い温度になると強度増加の割合は急激に大きくなり、促進養生の効果が大きいとされている。⁹⁾

図 5・8 より長期強度の大きい湿潤養生について、細粒分量と強度の関係を示すと図 5・9 となる。これによると、石灰添加量が少ない場合は、細粒分量は強度にあまり影響を与えないが、石灰添加量が多くなると細粒分量の増加にしたがい強度が大きくなる傾向にある。

そこで、石灰添加量、石灰反応率、重量増加率の関係を考えてみる。ここに重量増加率 $\delta_w(\%)$ は消石灰の炭酸化反応に基づく重量増加の割合を表わすもので、次式で示される。

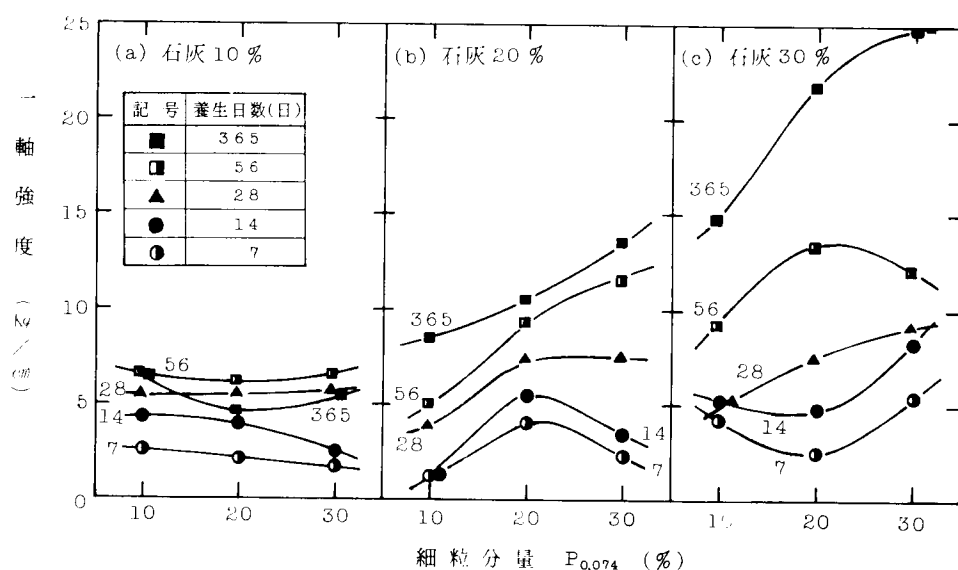


図 5・9 細粒分量による強度変化

$$\delta_w = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (5.3)$$

ここに、 W_1 ：作成時の供試体乾燥重量(g)

W_2 ：所定日数養生後の供試体乾燥重量(g)

式(5.1)，(5.2)，(5.3)より石灰反応率 P (%)は，

$$P = 2.85 \frac{a_l + 100}{a_l} \delta_w \quad (5.4)$$

ここに、 $a_l = \frac{W_l}{W - W_l} \times 100$ ：石灰添加量(%)

W_l ：供試体中の消石灰重量(g)

式(5.4)の関係を示したものが図5・10の3本の直線である。⁴⁾ この図により、石灰反応率、重量増加率、石灰添加量はつぎのように表わされる。すなわち、添加した石灰のうち同一重量が反応すると図中の破線で示される。また、一点鎖線は石灰反応率が等しい状態であり、添加した割合に比例して石灰が反応することを示している。

図5・10の3本の直線上に該当する養生日数を取り、等しい日数を結んだものが図5・11の破線である。同様に強度の等しい点を結ぶと実線のようになる。この図を用いることにより、強度あるいは石灰反応率を推定できる。たとえば、細粒分量10%で石灰添加量20%の供試体の14日養生後の強度および石灰反応率を推定する場合、図5・11(a)の石灰添加量20%の直線と養生日数14日の破線との交点から石灰反応率は25%、一軸強度は右上へ曲線(実線)を追って8.0 kg/cm²となる。

図5・11の養生日数と石灰反応率の関係をみると、14日養生までは図5・10の破線と同じ形である。すなわち、短期養生では石灰添加量にかかわらず等しい重量の石灰が反応する。また、石灰添加量が20%以下の範囲では、長期養生においても同様の傾向を示している。一方、石灰添加量が20%以上になると、とくに長期養生において図5・11の破線は水平に近くなり、図5・10の一点鎖線と似てくる。つまり、石灰添加量の多い場合は、添加した割合に比例して反応が進むことを示している。

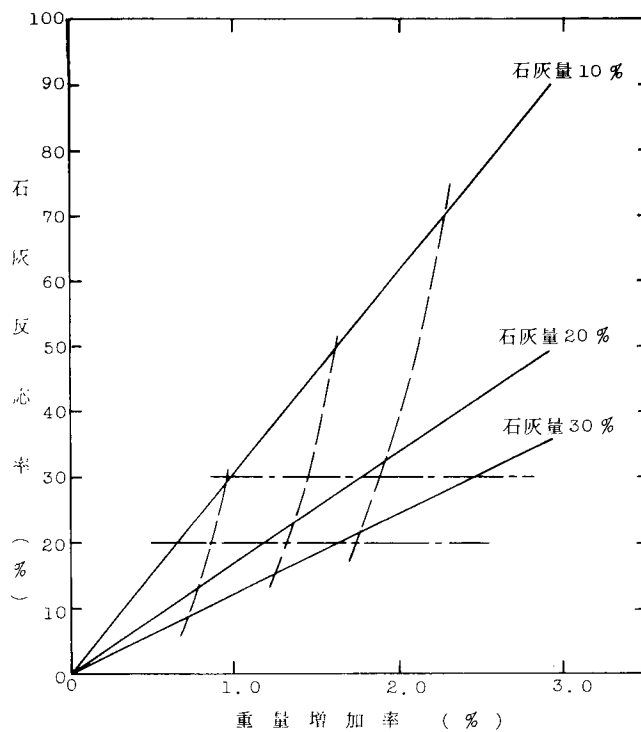


図5・10 石灰反応率と重量増加率

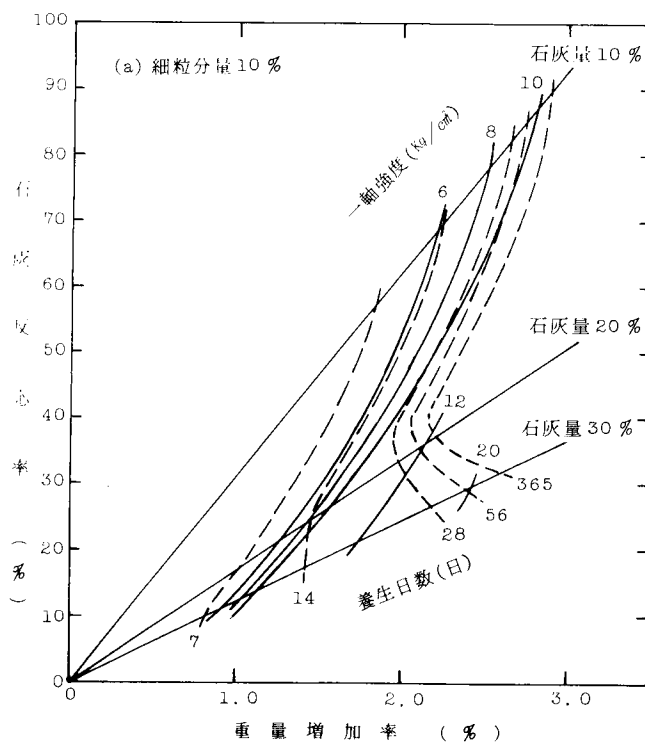


図5・11 石灰安定処理土の各要素の変化

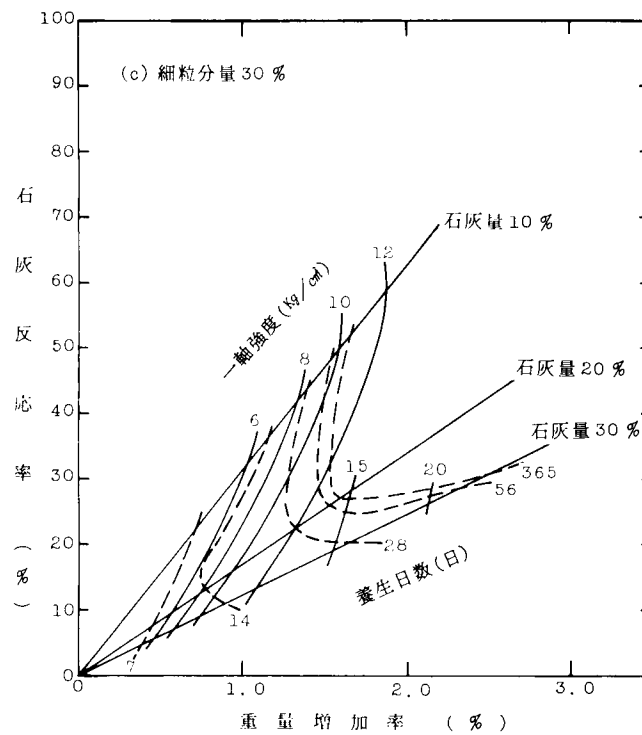
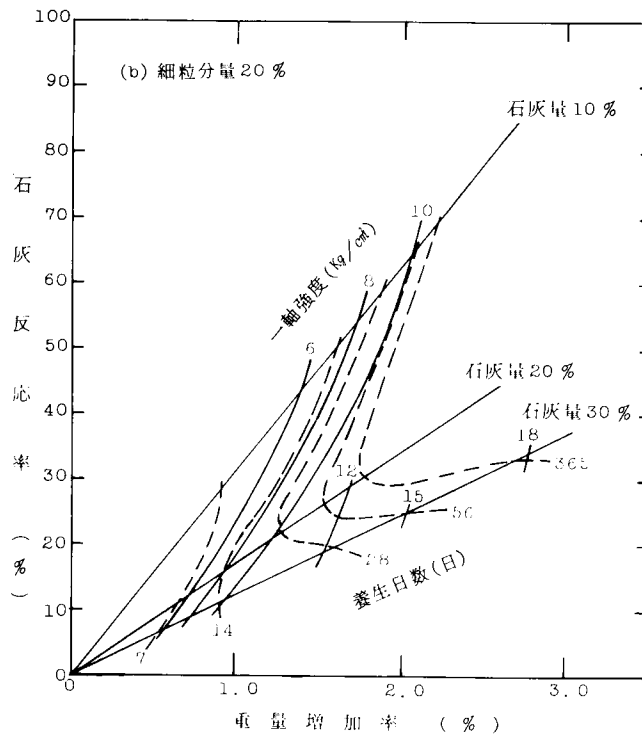


図 5・11 (続き) 石灰安定処理土の各要素の変化

反応の速度をみると、細粒分量および石灰添加量が少ないほど石灰反応率は早く伸びる傾向にある。すなわち炭酸化反応は早く終了する。だから、細粒分量が多く石灰添加量が多いほど、長期にわたって反応が持続するわけである。等しい石灰反応率における一軸強度をみると、細粒分量の多いほど大きな強度となる。これは、反応により生じる炭酸カルシウムと細粒子との結合が強度に関係しているからであると考えられる。

以上をまとめてみると、細粒分量と石灰添加量が多い場合反応はゆっくりと進むが、強度は大きく、しかも長期強度が期待できる。

5. 4. 2 細粒分の性質と安定処理効果

図 5・12 は、細粒分の性質を変化させた供試体 E の石灰安定処理効果を示したものである。¹⁰⁾ この図には同時に供試体 C と G-1 のものを併記した。すべての供試体について気乾養生である。また、供試体 G-1 以外は細粒分量が 20 % で、石灰添加量は 30 % である。これら供試体の細粒分の性質の違いは表 5・3 にまとめた。

表 5・3 細粒分の性質の違い

供試体	細 粒 分 の 性 質 の 違 い
C	ロサンゼルス試験機で原土を破砕したもの。
E-1	原土中の細粒子をふるい分けて、調整したもの。
E-2	原土を 74μ ふるいで水洗いして得た細粒子を粗粒分に加えたもの。
E-3	水洗いして 74μ ふるいに残留した粗粒子を破砕させ、 74μ 以下とし、これを粗粒分に加えたもの。
E-4	沖積粘土の 74μ ふるい通過分を粗粒分に加えたもの。
G-1	ロサンゼルス試験機で原土を破砕させ細粒分量を 10% に調整した試料に、フライアッシュを 10 % 添加したもの。 ただし石灰添加量は 10 % である。

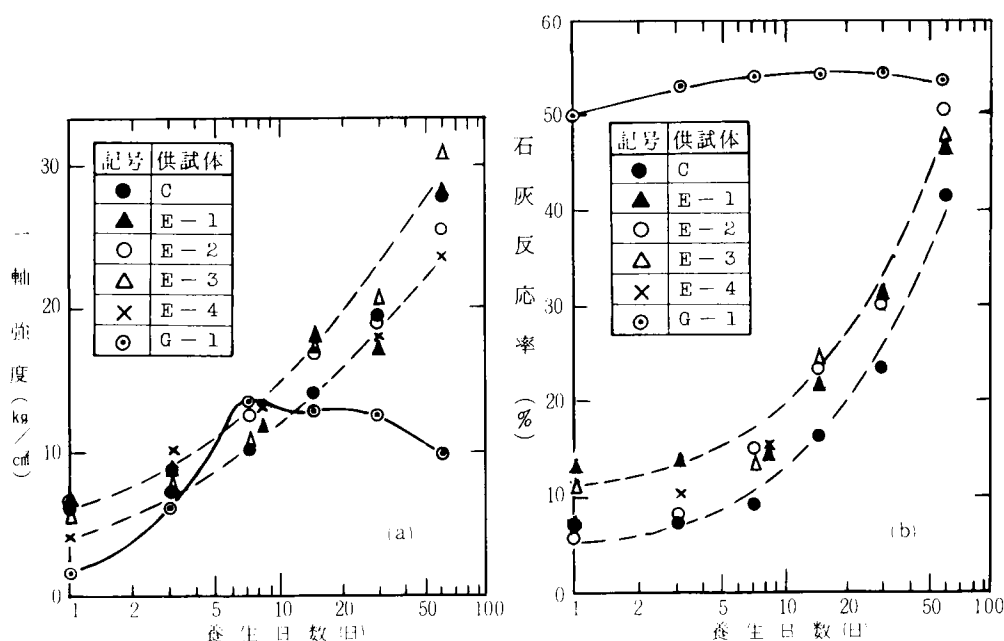


図5・12 細粒分の性質と処理効果の関係

図5・12(a)は養生に伴う一軸強度の変化をプロットしたものである。供試体G-1以外の5種類は、養生の進行につれてよく似た傾向で強度が増大している。これらの平均値からの偏差値は1～2 kg/cm²である。(b)図には炭酸化反応の反応率を示したが、これもG-1以外の5種類の供試体について有意の差は認められない。また、反応率は強度と同様に変化している。このことは、マサ土の処理強度がほとんど炭酸化反応に基づくものであることを裏づけている。すなわち、細粒分量が同じであれば、炭酸化による処理土の強度はほぼ同一であるといえる。

ところで、供試体G-1は石灰添加量と細粒分量が少なく、フライアッシュが添加されている。フライアッシュを細粒子の一部と考えると、細粒分量は供試体CおよびEと同じである。しかし、図5・12をみる限り、強度や反応率は全く違う傾向を示している。これはフライアッシュがポゾラン反応を起しやすいとされていることに関係すると考えられる。いずれにしても石灰添加量が少ないにもかかわらず、養生初期には他の5種類の供試体とほぼ同じ強度が得られている。すなわち、細粒分量や石灰添加量の少ない試料でも、フライ

アッシュを加えることにより、処理効果を高めることができる。また、供試体 G-1 は石灰反応率において他の 5 種類と全く異なる傾向を示し、炭酸化反応だけで説明できそうもない。このことは次項で取扱う。

5.4.3 フライアッシュの添加による安定処理効果^{4), 8), 11)}

図 5・13, 5・14 はそれぞれ細粒分 10%, 20% の試料に石灰を 10% 加え、さらにフライアッシュを 0, 2, 3, 5, 10, 20% 添加した供試体の一軸強度を示したものである。これらによると、気乾養生ではフライアッシュ添加量の多いものほど強度の発現が早く、かつ高い強度になっている。これは図 5・15 に示した含水比の激減時期と対応している。そして、3～7 日養生後に含水比が 1% 以下になると、その後の強度増加は起らない。一方、湿潤養生においては初期強度が低い、養生日数 56 日以降の長期強度は極端に上昇する。しかも

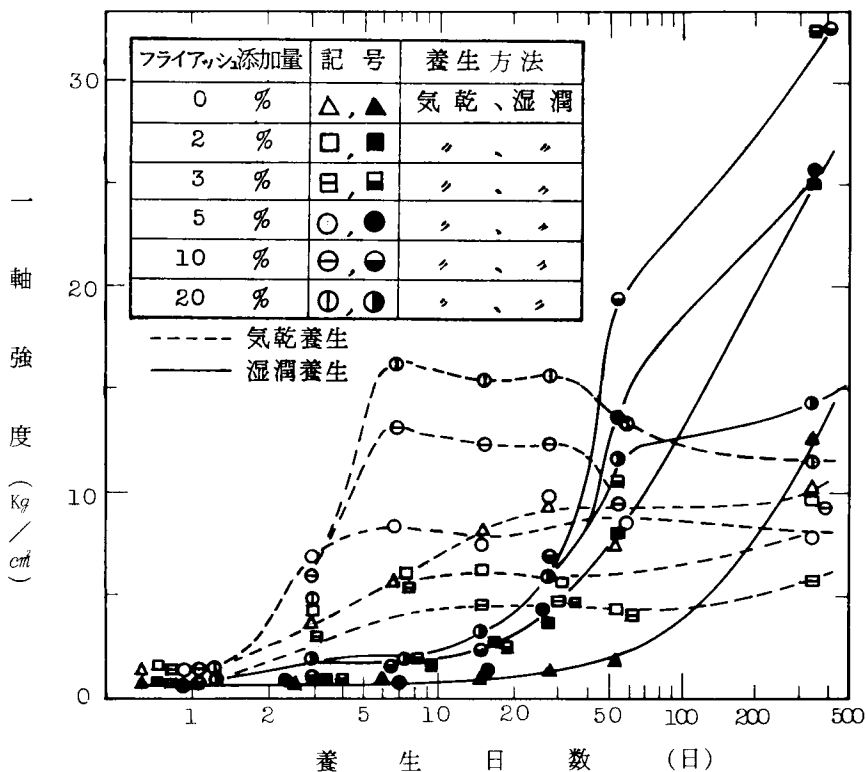


図 5・13 細粒分量 10% 試料の養生日数に対する強度変化

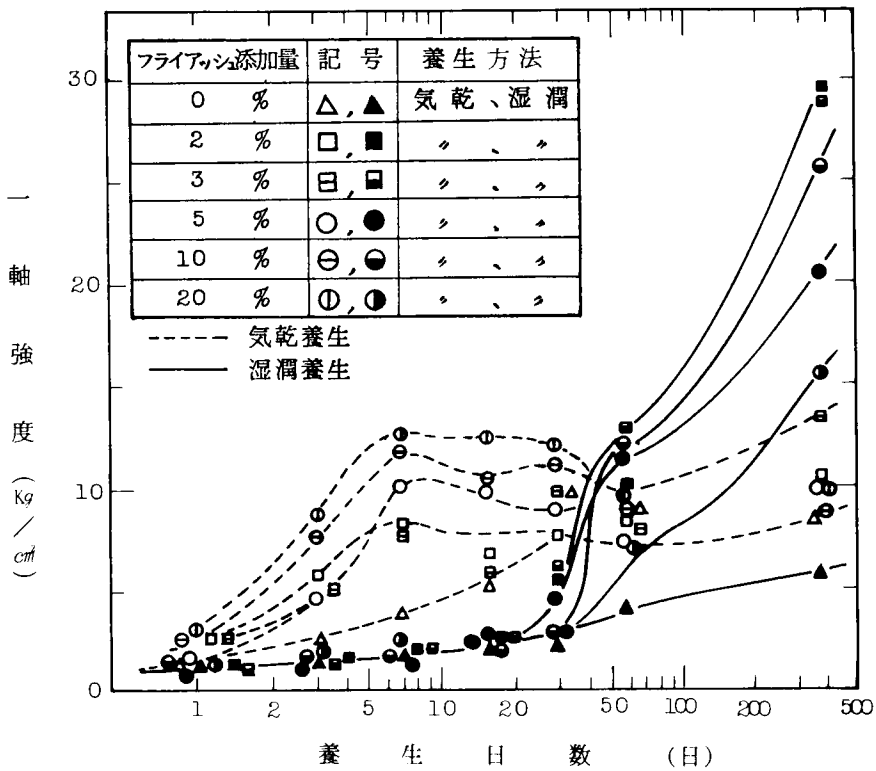


図5・14 細粒分量20%試料の養生日数に対する強度変化

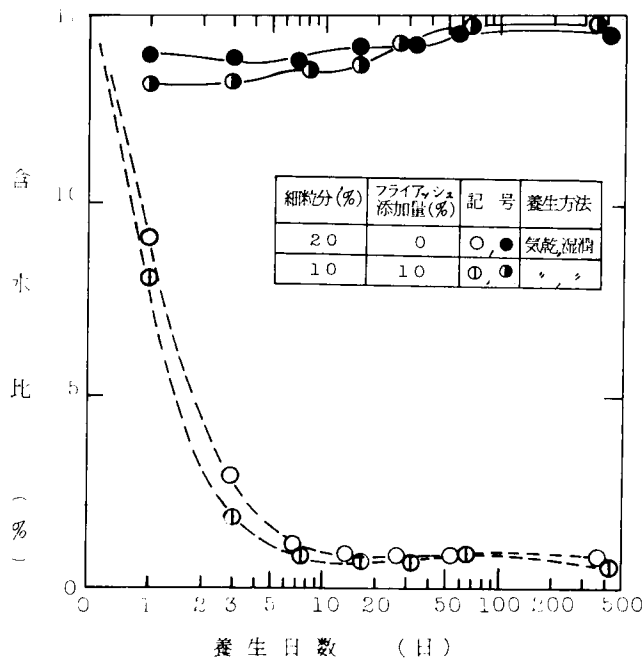


図5・15 養生日数に対する含水比の変化

気乾養生よりも大きな強度が得られる。⁸⁾ この現象は 5.3.2 においても、同様の傾向であり、石灰安定処理土の養生には湿潤状態が必要なことを示すものである。

一方、図 5・8(c)において、細粒分量 30 % のマサ土に石灰を 10, 20, 30 % 添加した供試体の強度を示した。これと、フライアッシュを添加した供試体の強度 (図 5・13, 図 5・14) を比較すると、細粒分量と石灰添加量の少ないマサ土においても、フライアッシュを数%添加することにより、多量の石灰を使用した場合とほぼ同等の強度が得られることがわかる。すなわち、フライアッシュの添加により石灰使用量を減らすことが可能となる。

図 5・16 は、フライアッシュ添加量 F_a に対する一軸強度を示した。ここで一軸強度としては、図 5・13, 5・14 より、気乾養生の場合、強度がほぼ一定になった値を採用した。また、湿潤養生の場合は 56 日養生後の一軸強度をプロットした。気乾養生において数%のフライアッシュでは効果が少なく、多量の添

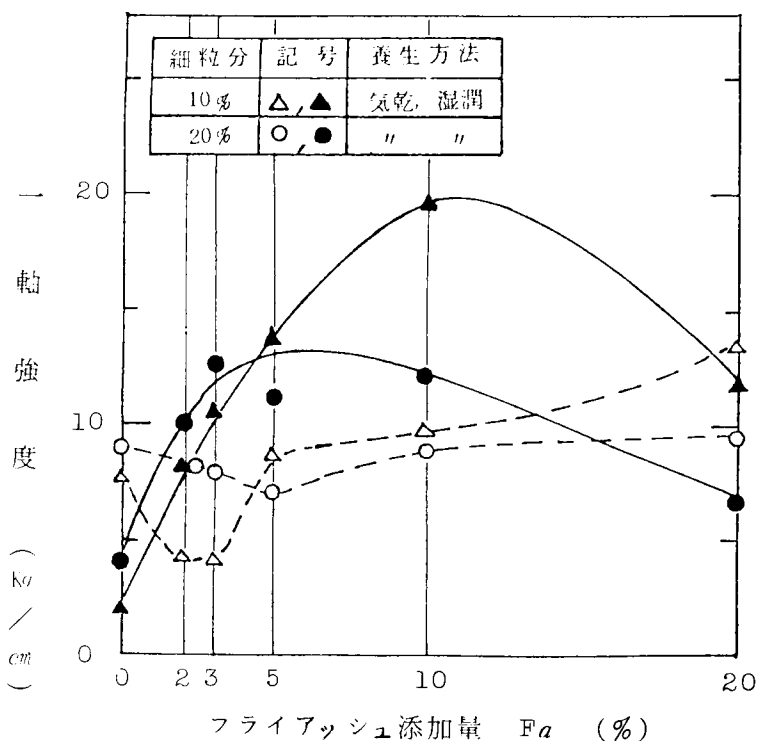


図 5・16 フライアッシュ添加量に対する一軸強度

加を必要とする。湿潤養生においては、細粒分量 10 % 試料の場合 $F_a = 10\%$ で最大強度を示し、フライアッシュ添加量がそれより多くても少なくとも一軸強度は小さくなる。一方、細粒分量 20 % 試料では $F_a = 2 \sim 3\%$ でピークを示す。すなわち、細粒分が増加すると、最大強度を与えるフライアッシュ添加量は少なくなっていく。

図 5・17 は試料の細粒分量により処理効果を比較したものである。また、図 5・18 は細粒分量 10 % 試料と 20 % 試料の強度差を示したものである。これらによると気乾養生では $F_a = 5\%$ までは細粒分量の増加により強度増加がみられるが、 $F_a = 10\%$ 以上になると、逆に細粒分量の増加により強度は減少している。湿潤養生においては、 $F_a = 3\%$ をピークにはほぼ同様の傾向になっている。細粒分の多い試料にフライアッシュを加えると、強度が減少する傾向にあることがわかる。これはフライアッシュの 75 % 以上が粒径 44μ 以下であるため、マサ土中の細粒子と相まって、細粒分量の過剰から強度の低下をきたしたものである。

前項の図 5・12 において、フライアッシュを添加した供試体の石灰反応率は、フライアッシュ無添加のものとは全く異なる傾向を示した。養生初期から高い反応率を示すはずはないので、この供試体の反応率を式 (5・2) で求めること

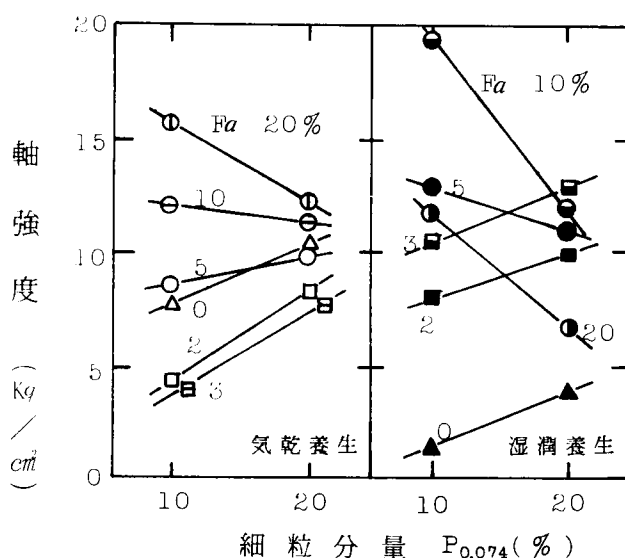


図 5・17 細粒分の量と処理効果の関係

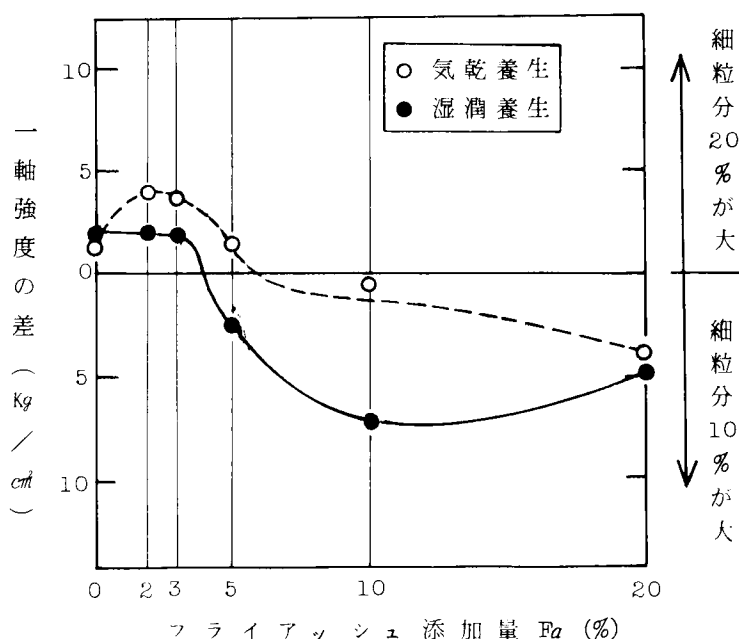


図5・18 細粒分の量による強度差

自体が疑問となる。したがって、フライアッシュを添加したものは炭酸化反応を主とした強度とは異なる別の反応（たとえばポゾラン反応）が生じているものと考えられる。そこで、これまでのいくつかの試料をX線回折により分析した。

図5・19にその結果を示す。⁵⁾

図5・19の中で(a)原土は、無処理のマサ土である。このマサ土には粘土鉱物がほとんどみられない。一次鉱物としては石英、長石のピークがある。(b)は消石灰のみの回折線である。ピークは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を示している。

(c)はマサ土に石灰を10%加えてから1日後のものである。マサ土と石灰とを組み合わせた回折線がみられる。(d)は(c)の120日養生後のもので、 3.04 \AA ($2\theta = 29^\circ$) 付近に CaCO_3 のピークがある。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークは消えて、炭酸化反応が進んだことを裏付けている。

(e)はマサ土に石灰を10%、フライアッシュを20%加えた供試体の1年養生後のものである。これにおいても CaCO_3 のピークは確認できるが、ポゾラン反応生成物については判定できない。これはポゾラン反応生成物の回折線が

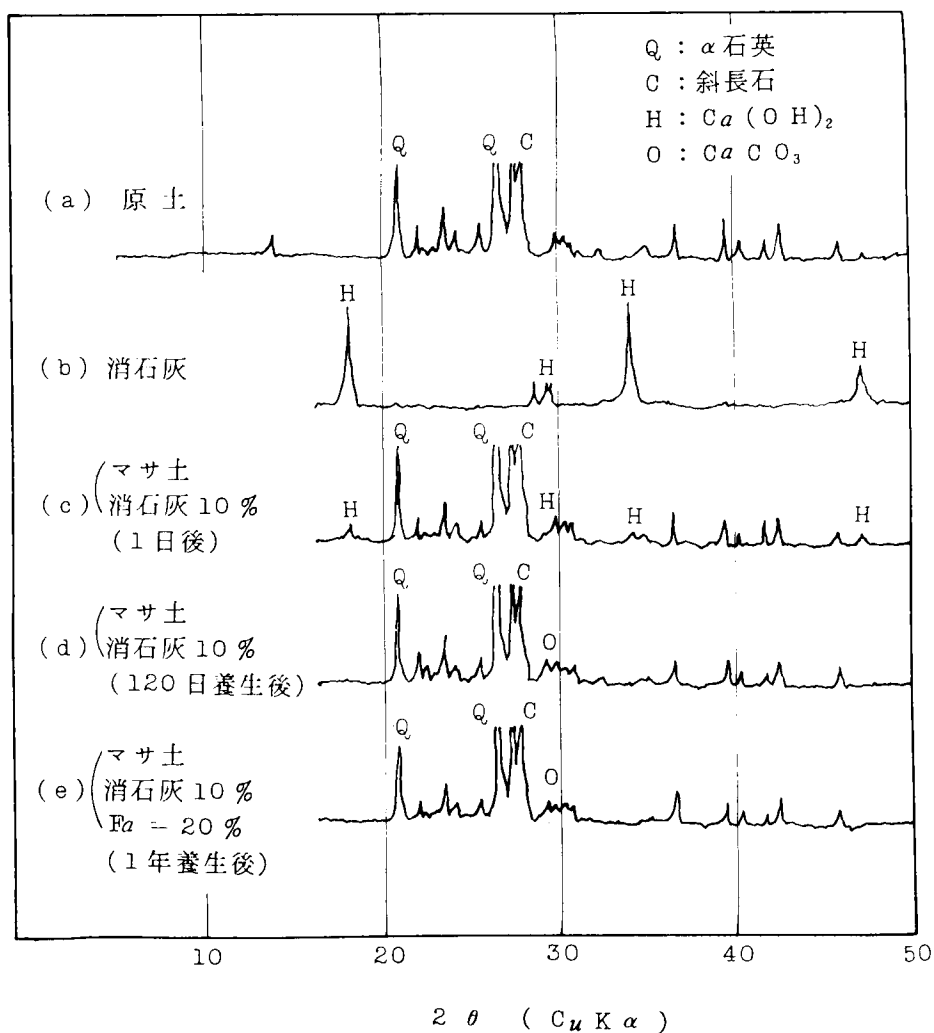


図 5・19 X 線回折による試料の分析

マサ土の一次鉱物と重なることがあるため、その確認を困難にしているからであると考えられる。

5.5 締固め密度と安定処理効果⁴⁾

締固め密度が強度に大きく関係するということは、土の高密度化が強度発現のために大きな要素となることから推察できる。締固め仕事量を変化させ、乾燥密

度を3種類 ($\gamma_d = 1.6, 1.7, 1.8 \text{ g/cm}^3$) とした供試体Fの養生日数と石灰安定処理土の強度の関係を示したものが図5・20である。

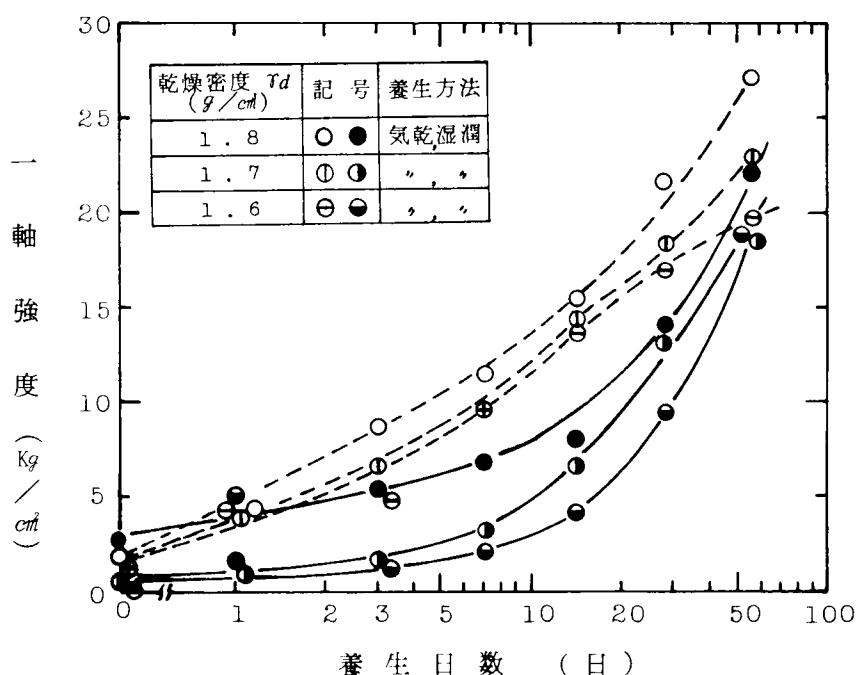


図5・20 乾燥密度による強度変化

また、図5・21は、各気乾養生日数に対する供試体作成時の乾燥密度と強度の関係である。これらによると、供試体作成時の密度によって明らかに強度に差があり、将来の強度が決定される。また、気乾養生では養生が進むにしたがって、強度の差が増大することがわかる。

以上により、密度は石灰安定処理土の強度発現に重要な要素であり、炭酸化反応をはじめ各種の反応も密度に影響されると推定できる。すなわち、土中の細粒子と石灰の接触状況が問題となるのである。このことは、従来から明らかにされているように、石灰安定処理における粉砕や混合の程度の重要性とも関連があるう。

表5・4は、砂質土について2, 3の結果を示して比較したものである。対象土が異なるので、直接比較することはむづかしいが、同じ試料内で比較すると、密度が強度に影響を及ぼしていることが確認できる。

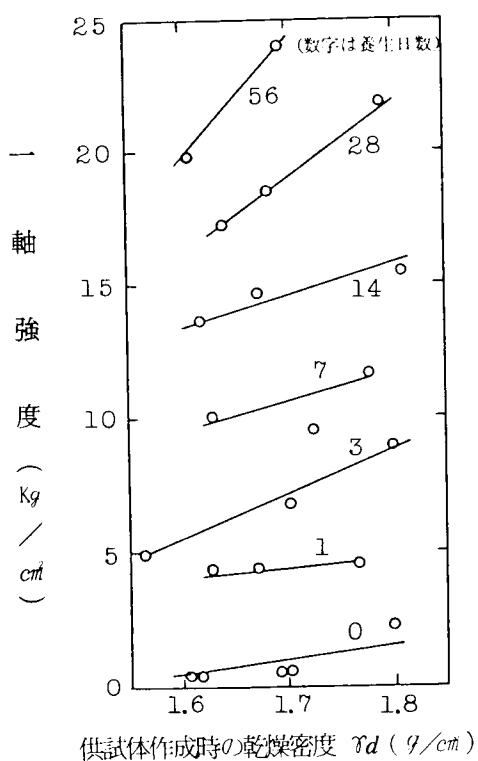


図5・21 乾燥密度と強度の関係

表5・4 砂質土の石灰安定処理に関する既応データとの比較

対象土	風化度	破 碎	細 粒 分 (%)	石 灰 量 (%)	最適含水比 (%)	密 度 (g/cm³)	28日強度 (kg/cm²)	備 考
① 比叡山 マサ土	大	未破碎	10	10	16	1.78	25	松尾 ²⁾ 宋
				20	16	1.68	28	
② 山 砂	—	未破碎	32	10	19	1.80	47	山田 ¹²⁾
				20	16	1.70	29	
③ 横尾山 マサ土	中	未破碎	0.4	10	15	—	2	本研究
				30	15	—	3	
		破 碎	20	30	15	1.79	22	
				30	15	1.70	19	
				30	15	1.60	17	

5.6 石灰安定処理の最適配合の推定

前節までに述べたように、マサ土の石灰安定処理の強度発現は、処理土の細粒分量、石灰添加量、副添加材（本研究ではフライアッシュ）の量および処理土の密度により影響を受けることが明らかとなった。本節では、処理土中の各構成成分の容積を求めて、容積比により、石灰や副添加材の最適配合を決定しようとする。

5.6.1 各成分の容積と容積比の算出

表5・5⁵⁾はフライアッシュを添加した供試体Gについて、成形時の重量（約30個の平均）、マサ土の細・粗粒分、消石灰、フライアッシュおよび水の重量配合比と比重を用いて、次式により供試体中に占める各構成成分の容積を求めたものである。

$$\left. \begin{aligned}
 V_1 &= \frac{1}{G_s \gamma_w} \left(1 - \frac{P_{0.074}}{100} \right) W_s \\
 V_2 &= \frac{1}{G_s \gamma_w} \frac{P_{0.074}}{100} W_s \\
 V_\ell &= \frac{1}{G_\ell \gamma_w} \frac{a_\ell}{100} W_s \\
 V_f &= \frac{1}{G_f \gamma_w} \frac{F_a}{100} W_s \\
 V_w &= \frac{1}{\gamma_w} \frac{w}{100} \left(1 + \frac{a_\ell}{100} + \frac{F_a}{100} \right) W_s \\
 V_a &= V - (V_1 + V_2 + V_\ell + V_f + V_w)
 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

ここに、 V ：供試体容積 (cm^3)

$V_1, V_2, V_\ell, V_f, V_w, V_a$ ：マサ土の粗・細粒分，石灰，フライアッシュ，
水，および空隙の容積 (cm^3)

G_s, G_ℓ, G_f ：マサ土，石灰，フライアッシュの比重

$P_{0.075}$: マサ土の細粒分量 (%)
 a_ℓ : 石灰添加量 (%)
 F_a : フライアッシュ添加量 (%)
 γ_w : 水の単位体積重量 (g/cm^3)
 w : 供試体の含水比 (%)
 W_s : 供試体中のマサ土の乾燥重量(g)

$$W_s = \frac{W}{\left(1 + \frac{w}{100}\right) \left(1 + \frac{a_\ell}{100} + \frac{F_a}{100}\right)} \quad (5.6)$$

W : 供試体重量(g)

また、マサ土細粒分、石灰、フライアッシュの三者、すなわち供試体中の細かな粒子を充填材と定義する。そして、供試体中の粗粒分以外の容積中に充填材が占める割合を充填率 q (%) とする。さらに、充填材中の石灰の割合を石灰充填材比 r (%) とし、表 5・5 においてこれらを計算する。⁵⁾

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \text{充填率 } q &= \frac{V_2 + V_\ell + V_f}{V - V_1} \times 100 \\ \text{石灰充填材比 } r &= \frac{V_\ell}{V_2 + V_\ell + V_f} \times 100 \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

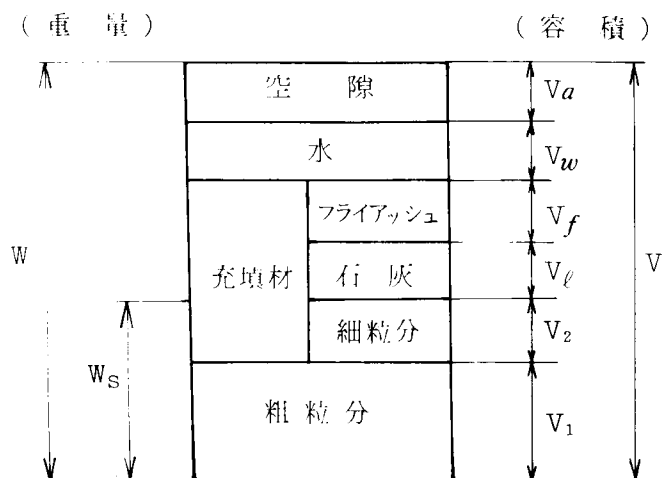


図 5・22 供試体中の構成成分

表 5・5 フライアッシュを添加した供試体構成成分の容積

細 粒 分 (%)	10					20						
	0	2	3	5	10	20	0	2	3	5	10	20
フライアッシュ添加量 (%)												
①供試体成形時重量 (g)	125.085	131.848	132.253	132.100	133.051	132.901	132.280	133.969	134.088	132.328	131.442	129.712
②マサ土粗粒分容積 (cm ³)	33.904	35.099	34.896	34.244	33.060	30.476	32.705	32.529	32.269	31.290	29.792	27.136
③マサ土細粒分容積 (cm ³)	4.275	4.427	4.400	4.320	4.168	3.846	7.670	7.633	7.572	7.339	6.986	6.363
④石灰容積 (cm ³)	4.069	4.213	4.188	4.113	3.966	3.657	4.303	4.281	4.246	4.120	3.918	3.569
⑤フライアッシュ容積 (cm ³)	0	0.907	1.354	2.221	4.283	7.905	0	0.922	1.373	2.225	4.232	7.715
⑥水分容積 (cm ³)	16.315	17.198	17.250	17.230	17.354	17.335	17.254	17.474	17.490	17.261	17.145	16.919
⑦構成成分容積②+③+④+⑤+⑥ (cm ³)	58.562	61.844	62.088	62.127	62.831	63.219	61.932	62.838	62.950	62.235	62.073	61.702
⑧空隙容積 V - ⑦ (cm ³)	4.657	1.375	1.131	1.092	0.388	0	1.287	0.381	0.269	0.984	1.146	1.517
⑨石灰充填材比④/③+④+⑤ (%)	48.8	44.1	42.1	38.6	31.9	23.7	35.9	33.4	32.2	30.1	25.9	20.2
⑩充填率 ③+④+⑤ / (V - ②) (%)	28.5	34.0	35.1	36.8	42.7	41.2	39.2	41.8	42.6	42.9	45.3	48.9
⑪乾燥密度 γ_d (g / cm ³)	1.721	1.814	1.819	1.817	1.830	1.828	1.819	1.843	1.844	1.820	1.808	1.784

注 1) 空隙は、構成成分容積のもっとも大きいものを0と仮定して計算した。V = 63.219 cm³

注 2) 供試体構成成分の比重は以下のとおりである。

マサ土 { 粗粒分 — 2.59 消 石 灰 — 2.43
 細粒分 — 2.59 フライアッシュ — 2.25

表 5・6 は、細粒分量と石灰添加量が同じで締固め密度を変化させた供試体 F および細粒分量と石灰添加量を変化させた供試体 D について、空隙、石灰充填材比および充填率を計算したものである。¹¹⁾

表 5・6 供試体 D, F の構成成分の容積

供試体の記号	F-1	F-2	F-3	D-1			D-2			D-3		
細 粒 分(%)	19.0			11.2			19.8			27.9		
石 灰 添 加 量(%)	30	30	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
供試体成形時重量 (g)	127.034	120.413	115.053	132.486	130.889	126.934	132.611	130.256	126.857	133.280	128.634	124.716
空 隙 (V=63.219cm ³)	3.850	6.471	8.997	1.191	1.720	3.397	1.132	2.017	3.434	0.820	2.780	4.444
石 灰 充 填 材 比(%)	62.7	62.7	62.7	48.8	65.6	74.1	35.0	51.8	61.8	27.6	43.3	53.4
充 填 率(%)	45.6	41.7	38.7	32.4	38.8	41.5	40.1	44.1	45.9	46.3	47.5	48.2
乾 燥 密 度 (g/cm ³)	1.747	1.656	1.583	1.822	1.800	1.746	1.824	1.792	1.745	1.833	1.769	1.715

注) 比重その他の条件は表 5・5 と同じ。

表 5・5 および表 5・6 における空隙容積 V_a と乾燥密度の関係を表わしたものが図 5・23 である。図 5・22 および式 (5.5) を用いて乾燥密度 γ_d と、空隙容積 V_a の関係を求めるとつぎのようになる。

$$\gamma_d = \frac{1}{\frac{w}{100} + \frac{1}{G}} \left(1 - \frac{V_a}{V} \right) \gamma_w \quad (5.8)$$

$$\frac{1}{G} = \frac{\frac{1}{G_s} + \frac{1}{G_f} \frac{a_f}{100} + \frac{1}{G_f} \frac{F_a}{100}}{1 + \frac{a_f}{100} + \frac{F_a}{100}} \quad (5.9)$$

ここに、 $\frac{1}{G}$ は、土粒子、石灰、フライアッシュの比重の逆数の加重平均であり、他の記号は式 (5.5) と同じものである。

式 (5.8) 内の $\frac{1}{G}$ は各構成成分の比重と添加量により決定できる。表 5・5, 5・6 にまとめた供試体について計算すると、表 5・7 のようである。

表5・7 $\frac{1}{G}$ の計算値

$\begin{matrix} F_a (\%) \\ a_t (\%) \end{matrix}$	0	2	3	5	10	20
10	0.3884	0.3894	0.3899	0.3908	0.3931	0.3970
20	0.3903	0.3912	0.3917	0.3925	0.3945	0.3981
30	0.3920	0.3928	0.3932	0.3939	0.3957	0.3990

この表より、 $\frac{1}{G}$ の最大値、最小値を用い、 $V = 63.219 \text{ cm}^3$ 、 $w = 15 \%$ 、 $\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$ を用いて、式(5・8)を計算するとつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{G}\right)_{\max} &= 0.3990 & : \gamma_d &= 1.821 - 0.0288 V_a \\ \left(\frac{1}{G}\right)_{\min} &= 0.3884 & : \gamma_d &= 1.857 - 0.0294 V_a \end{aligned} \right\} \quad (5 \cdot 10)$$

図5・23の破線は、式(5・10)の関係を示したものである。

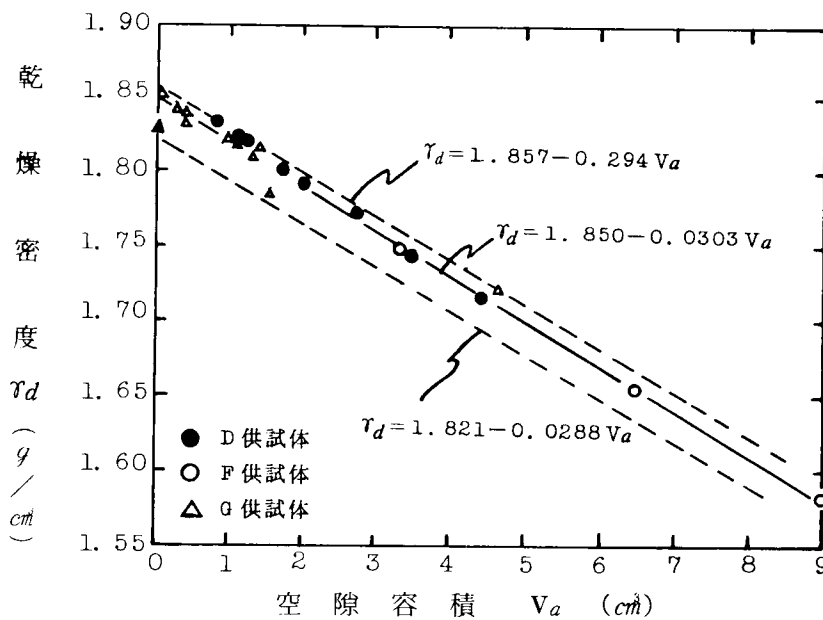


図5・23 空隙容積と乾燥密度の関係

一方、プロットした点を結んだ直線の式は、

$$\gamma_d = 1.850 - 0.0303 V_a \quad (5 \cdot 11)$$

となり、式(5・10)の二直線の間に入ってくる。このように細粒分量、石灰添加量、フライアッシュ添加量が異なるにもかかわらず、計算で求めた空隙容積と実験より求めた乾燥密度がほぼ一直線上に展開し、かつ、理論的な計算式(5・10)の間に入ることは、表5・5および表5・6の計算に用いた仮定が妥当であったことを示すものである。

5.6.2 石灰およびフライアッシュの最適添加量の推定

(1) フライアッシュ添加量の推定法

表5・5より、供試体構成成分ごとに容積のもっとも少ないものを基準にして容積変化量を算出し、これとフライアッシュ添加量 F_a の関係を表わしたものが図5・24である。この図には同時に充填率、石灰充填材比および56日養生後の一軸強度も示している。

これによると、細粒分量10%において $F_a = 0\%$ の場合、石灰充填材比は48.8%と大きい、充填材の量が少なく空隙が多いため強度は低い。フライアッシュ添加量が増えるにしたがって、空隙およびマサ土粗粒分が減少し、この減少量を充填材が埋めていき、強度が増大する。 $F_a = 10\%$ 強で空隙は埋めつくされ、強度は最大となる。さらにフライアッシュを増加し $F_a = 20\%$ にすると、空隙の減少はほとんどなくなり、マサ土粗粒分の減少量より充填材の増加量が大きくなる。このことは充填材過多を生じ、乾燥密度の減少として現われる(表5・5参照)。また、石灰充填材比も小さくなり、強度減少の原因となっている。

以上の傾向は細粒分量20%の場合でも同様で、 $F_a = 3\%$ で空隙が最小になり、乾燥密度および強度のピークと一致する。したがって、石灰安定処理土の強度発現は、供試体の空隙の量および乾燥密度に大きく影響する充填率と、粒子をより強固に固結させる反応の促進という意味から石灰充填材比が問題となる。

図5・25は細粒分量10%、20%試料の56日養生後の一軸強度と充填率

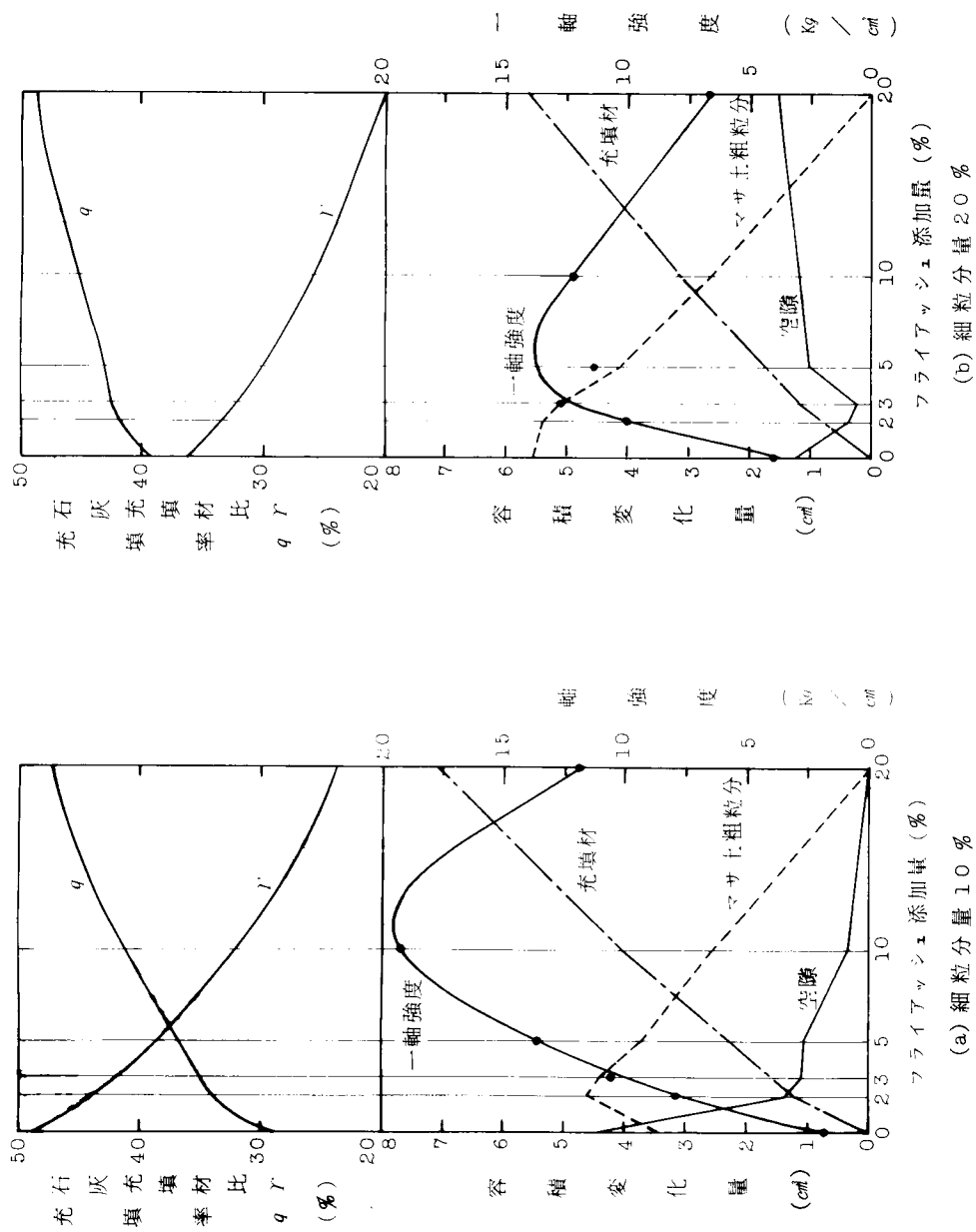


図 5・24 供試体構成成分の容積変化と一軸強度

および石灰充填材比との関係を表わしたものである。¹¹⁾ これによると、細粒分量 10 % 試料は細粒分量 20 % 試料にくらべて、フライアッシュ添加による充填率および石灰充填材比の変化幅が大きく、一軸強度も高い。しかしながら両者とも最大強度を与える充填率が約 43 %、石灰充填材比が約 31 % とほぼ同じ値になっている。

すなわち、石灰添加量が 10 % のマサ土では、細粒分量が決まると充填率、石灰充填材比より最大強度を与えるフライアッシュ添加量が推定できる。

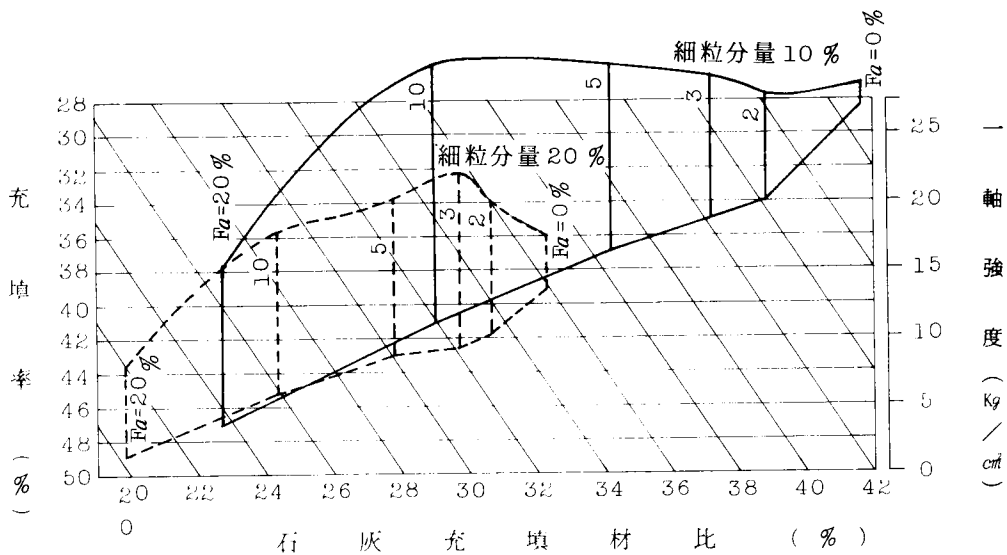


図 5・25 充填率、石灰充填材比に対する強度変化

(2) 石灰添加量の推定

図 5・8 および図 5・20 より得られる 1 年間湿潤養生後の強度と、表 5・6 の石灰充填材比、充填率との関係を表わすと図 5・26 のようになる。¹¹⁾

供試体 F は同じ石灰添加量と同じ細粒分量の供試体であり、石灰充填材比は同じ値となる。したがって、充填率が高くなるほど空隙が減少し、乾燥密度が上昇して高強度になる。

供試体 D について、同じ細粒分量で石灰添加量を増加させると、充填率は大きくなるが、空隙の量も増え密度は減少する。しかしながら、石灰充填材比が増加することにより強度は高くなっていく。一方、同じ石灰添加量で細

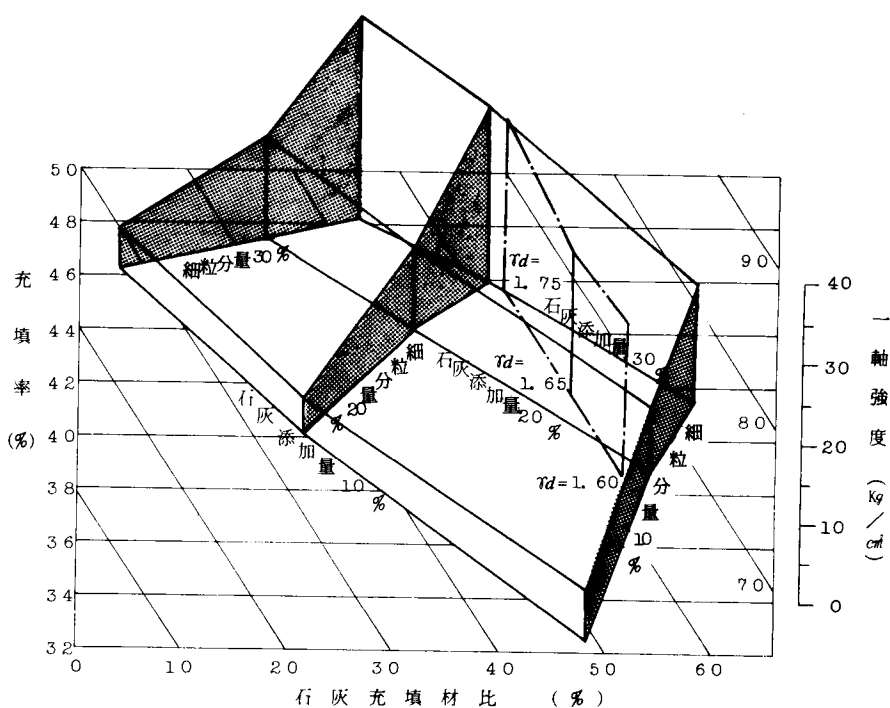


図5・26 充填率、石灰充填材比に対する強度変化

粒分量を増していく場合、充填率は当然増加していく。そして表5・6にみられるように、石灰添加量10%では密度がほとんど変わらず強度も変わらない。しかし、石灰添加量が20%、30%になると、細粒分量の増大に伴い密度は減少し、逆に強度は若干増加していく。これは、成形時の密度だけが単に養生後の強度を支配しているものでないことを示唆している。

また、図5・26より、充填率が一定である試料において、本実験の範囲（石灰添加量、細粒分量ともに30%以内）であれば、石灰充填材比の多いものほど高い強度を与える。つまり、石灰添加量の多いほど改良効果が良いことを示している。しかし、もう少し大きい細粒分量、石灰添加量で実験すれば、フライアッシュ添加試料を整理した図5・25に現われたようなピークが存在すると考えられる。ところが30%以上の石灰添加量は経済的には非現実的であり、マサ土中の細粒分量も30%を越えることはまれである。したがって、石灰のみで安定処理を行い最大の処理効果を得るためには、細

粒分量と石灰添加量をできるだけ多くすればよいことになる。

実際の設計では目標となる処理強度がまず決定され、それを満足する最少の石灰添加量を決定することになる。したがって、図5・25、5・26ともに、細粒分量、石灰添加量間隔をもう少し小さくして、データを求めておく必要がある。

5.7 結 語

消石灰を用いたマサ土の安定処理において、マサ土中の細粒子の影響を研究した結果、つぎのような結論を得た。

- (1) 風化のあまり進んでいないマサ土について、粒子破碎を起さずに石灰で安定処理しても、処理効果は現われない。しかしながら、十分に粒子破碎をさせて細粒分量を増加させると、高い強度が得られる。強度を増大させる原因は、破碎細粒子による粒径の適性化、高密度化とともに、消石灰の炭酸化反応に基づく細粒子の固結である。
- (2) 消石灰の炭酸化反応は、理論的には石灰反応率や重量増加率により表わすことができる。石灰添加量が20%以下の場合には、添加量の大小にかかわらず等量の石灰が反応するが、20%以上の添加量になると、とくに長期養生では添加量に比例して反応する。しかも、細粒分量と石灰添加量の多い場合、反応はゆっくりと進み長期強度が期待できる。
- (3) マサ土中の細粒分の性質を少々変えても、炭酸化反応による処理効果には影響を与えない。ただし、ボゾラン反応を期待して添加したフライアッシュが存在すると、全く異なった傾向が生じる。フライアッシュは細粒分量や石灰添加量の少ない試料の処理効果を高めることができ、石灰使用量を減らすことができる。ボゾラン反応による反応生成物の確認をX線回折法で行おうとしたが、回折線が一次鉱物のものと重なり不可能であった。
- (4) 養生方法による処理土の強度の違いをみると、気乾養生では含水比の急激な低下のために短期強度（7日～28日）が高くなる。一方、湿潤養生では長期強度（56日以上）が急速に増大する。このことは、副添加材として

フライアッシュを添加した処理土について、もっとも明確に現われている。とくに、供試体の含水比の変化をあわせ考えると、石灰安定処理には湿った状態が必要であることがわかる。

また、養生時の温度による影響を示すデータは少なかったが、常温より高い温度がよい処理効果を与えている。

- (5) 処理土の締固め時の密度は強度発現の重要な要素である。とくに気乾養生では、養生の進むにつれて、初期密度の違いによる強度差が大きくなる。
- (6) 供試体成形時の重量、構成成分の重量配合比と比重を用いて各構成成分の容積を求めると、空隙容積と乾燥密度の関係が理論曲線とはほぼ一致する。すなわち、容積計算の仮定と実験が正しく行われたことを示している。
- (7) 上記の容積のうち、充填材（マサ土の細粒子、石灰、フライアッシュ）が処理土中の粗粒子以外の部分に占める割合を充填率、充填材中に石灰の占める割合を石灰充填材比と定義した。これら二つの指標によって処理土の強度を整理すると、フライアッシュや石灰の最適配合が推定できる。

消石灰のみで安定処理する場合、マサ土中の細粒分量が 30 % 以下では、消石灰添加量が多いほど改良効果はよい。一方、フライアッシュを副添加材に使用する場合、石灰添加量 10 % では、細粒分量の多少にかかわらず充填率約 43 %、石灰充填材比約 31 % において最大強度を与える。

参 考 文 献

- 1) 日本石灰協会：石灰安定処理路床追跡調査，1978.
- 2) 松尾新一郎，宋永焜：X線および電子顕微鏡による石灰安定処理土の構造的
研究，土木学会論文報告集，No.193，pp. 59～68，1971.
- 3) 松尾新一郎，宋永焜，大藤進，中村嘉次：石灰によるマサ土の土質安定に関
する研究，日本石灰協会，石灰による土質安定工法に関する実験報告（第1
報），pp. 1～44，1970.
- 4) 澤孝平，友久誠司：マサ土の石灰安定処理における細粒子の影響について，
明石工業高等専門学校研究紀要，第22号，pp. 87～99，1980.
- 5) 澤孝平，友久誠司：フライアッシュを添加したマサ土の石灰安定処理に関す
る研究，明石工業高等専門学校研究紀要，第23号，pp. 51～58，1981.
- 6) 澤孝平，友久誠司：マサ土の安定処理について，日本材料学会，土質安定材
料に関する講演会，pp. 31～32，1977.
- 7) 松尾新一郎，澤孝平，友久誠司：石灰によるマサ土の安定処理に関する実験
的研究(2)，第32回土木学会年次学術講演会概要集（第3部），pp. 472～
473，1977.
- 8) 松尾新一郎，澤孝平，友久誠司：フライアッシュを添加したマサ土の石灰安
定処理について，第34回土木学会年次学術講演会概要集（第3部），pp.
167～168，1979.
- 9) 三嶋信雄：現場における安定処理混合物の強度予測—主として路床路盤を対
象として—，土と基礎，Vol. 25, No. 1, pp. 31～38，1977.
- 10) 松尾新一郎，澤孝平，友久誠司：石灰によるマサ土の安定処理に関する研究
（第3報），第33回土木学会年次学術講演会概要集（第3部），pp. 272
～273，1978.
- 11) 松尾新一郎，澤孝平，友久誠司：石灰安定処理土中の充填材の影響に関する
一考察，第15回土質工学研究発表会講演集，pp. 737～740，1980.
- 12) 山田公夫：石灰安定処理による一軸圧縮特性，第28回土木学会年次学術講
演会概要集（第3部），pp. 244～245，1973.

第6章 結 論

本研究ではマサ土の風化特性について、とくに風化形式が個々の鉱物に及ぼす影響について明らかにし、その上で粒子破砕の現象を解明した。さらに、破砕性粒子の安定化という意味から石灰安定処理の研究を行った。何事も欠点のすぐ近くに長所があるように、「粒子破砕は欠点であるが、長所でもある」というのが著者の結論である。というのは、破砕性粒子を有するマサ土を安定処理する場合、この破砕された細粒子が有効な役割を果たすからである。

本研究の成果を各章ごとにまとめるとつぎのとおりである。

第1章の緒論において、マサ土の特殊性を述べ、その中で風化特性と粒子破砕の研究の必要性を明らかにした。

第2章ではマサ土の風化特性について研究した。まずマサ土中の石英および長石粒子の風化に伴う変化を微視的に明らかにした。石英粒子は網目状のクラックが発達して細粒化し、長石粒子は節理方向にクラックが発達して変質していく。このような鉱物の変化、変質の相違は風化形式の違いとして表現しうる。すなわち、物理的風化の著しいマサ土では石英が細粒化し、化学的風化の卓越したマサ土では長石が変質する傾向が明らかになった。

この風化形式の判定方法として、風化花崗岩の破断面観察が有効である。また、風化度の量的な表示方法としては、単位体積重量や吸水率によって化学的風化が表現でき、粒子の反発係数により物理的風化の程度が表示できることが判明した。

一方、マサ土の色調が風化度および鉱物組成により影響されることから、風化度の表示として、色調が有力であることがわかった。測定機器を簡便化することにより、現地における風化度判定の有力な手段となるものである。

第3章においては落下法により土粒子の破砕特性を研究した。

単一粒径試料の破砕性の表示として破砕率と移動率を提案した。多くの粒径が混在する現実のマサ土でも、粒径加積曲線の中央径と20%径の変化を用いて、これらの指標が求められる。破砕率と移動率によって三種類の粒子破砕形式がうまく表現できることを明らかにした。

粒子の変質は風化特性と関係があることから、粒子破碎も風化特性の影響を受けている。鉱物別に破碎すると、長石は石英に比して破碎されやすく細粒化しやすい。これは化学的風化に伴う長石の変質に関係があり、長石粒子の破碎は粒子全体が粉碎される完全破碎として生じることが判明した。一方、石英粒子は一般に破碎されにくく、破碎形式は分割破碎となることが認められた。

また、多くの鉱物が混在しているマサ土では選択破碎が起る。すなわち、粘土化した長石や雲母が最初に破碎され、つぎにある粒径比になると堅くて粗い石英が選択的に破碎される。このように、粒子破碎は強度的に弱い粒子から破碎が起るが、比較的強いといわれている石英粒子にも破碎が生じることが注目すべきことである。どのレベルの粒子まで破碎されるかは、加えられる仕事量に関係するものである。

一方、多くの粒径の混在するマサ土では、 0.42 mm 以下の細粒子が10%程度存在するとき、もっとも破碎されやすい結果を得た。

この粒子破碎現象が起る実際問題として、土の締固め試験との関係を研究したものが第4章である。ここでは突固めによる締固め試験時の粒子破碎特性を通じて、粒子破碎と締固め特性の関係を明らかにした。突固め総仕事量を増すと破碎率は増大するが、同じ総仕事量であっても、ランマーの打撃一回当りの仕事量（単位仕事量）の大小により破碎性は異なる。これは締固め試験の仕事の加えられ方が繰返し仕事であることから、一般の材料の疲労破壊と同じ考え方で説明できる。

また、破碎性と締固め特性の関係として、含水比の違いによる粒子破碎を考えると、土中の水量が多いほど土粒子強度が減少して破碎しやすくなる。しかし、水量が多すぎると粒子が動きやすくなり、破碎性は減少する。したがって、もっとも破碎の起りやすいのは、風化の進んだマサ土では最適含水比のわずかに湿潤側であり、未風化のマサ土ではその乾燥側であることが明らかになった。

一方、密度との関係としては、破碎性の少ないマサ土、すなわち風化度の小さいマサ土ほど最大乾燥密度は高い。さらに、突固め総仕事量のうち、土粒子の高密度化に消費されるもの（乾燥密度で表わされる）と粒子破碎に消費されるもの（破碎率で表わされる）について考えると、突固め総仕事量の増大（突固め回数

の増大)の過程で、粒子破碎と高密度化の関係が理解しやすい。すなわち、強風化土では小さい仕事量の範囲で粒子破碎が起り、高密度化はある程度以上の仕事量で生じる。一方、未風化土では大きな仕事量になると粒子破碎が生じ、それ以前の小さい仕事量の範囲では高密度化に消費される仕事量が多いことを明らかにした。

第5章では破碎性粒子を安定化させることを目的として、石灰安定処理に関する研究を行った。その結果、石灰安定処理には細粒子が有効な役割を果たすことが明らかになった。

消石灰によるマサ土の安定処理の反応原理は、大部分が炭酸化反応である。これは、処理土の一軸圧縮強度と炭酸化に伴う石灰反応率の関係の多くのデータおよびX線回折結果により確認された。そして、炭酸化の反応速度は細粒分量に関係があり、細粒分量の少ない処理土ほど反応速度が早い。しかし、同一の反応率で強度を比較すると、細粒分量の多いほど強度は大きい。これは反応により生じる炭酸カルシウムと細粒子との結合に関係していると推定される。

一方、細粒分の質的变化は安定処理効果にあまり影響していない。しかし、ポズラン反応を期待したフライアッシュ添加の石灰安定処理土は、無添加のものに比して格段の処理効果をもっていることが認められた。このことは、フライアッシュ添加により石灰量の節約が可能であり、経済的な安定処理ができることを示している。さらに、処理土の強度が密度と密接な関係にあることがわかり、施工面における転圧の重要性があらためて明らかとなった。

石灰安定処理土中の各構成成分(土粒子、石灰、フライアッシュ等)は各々比重が異なる。したがって、最大密度の考え方による配合より、最適空隙量の考え方に基づく配合が適切である。充填率や石灰充填材比という容積比を導入すると、石灰やフライアッシュの最適添加量の判定に有効であることが明らかになった。この方法によると、今回用いたマサ土では細粒分量の多い場合も少ない場合も、石灰添加量が多いほど良い処理効果が得られた。また、フライアッシュの最適添加量はある一定の充填率と石灰充填材比で決定されることが認められた。

本研究の成果は室内での小規模な実験の結果である。破碎仕事量はできるだけ広範囲に採用したが、実際の建設工事での粒子破碎の挙動は幾分異なったものに

なることも考えられる。しかし、鉱物別の破碎形式や選択破碎などの粒子破碎に関する基本的な考え方や定性的な傾向については、本研究で示した結果が適用できる。

一方、石灰安定処理についても、現場サイズでは数々の問題が残されており、一層の検討を要するものである。たとえば、マサ土中の細粒分量を増やすための簡単な粒子破碎方法、石灰添加量を少なくして処理効果を高めるための細粒分量やフライアッシュの最適添加量の合理的な決定法、最良の養生方法、フライアッシュ以外のより効果的な副添加材の開発などである。

謝 辞

本論文は著者が京都大学工学部土木工学教室に在籍中から引つづき行った研究の成果をまとめたものである。著者が京都大学工学部土木工学科および同大学院修士課程に在学中より今日まで、指導教授として終始懇切な御指導と御鞭撻を賜わった京都大学工学部教授工学博士松尾新一郎先生に衷心より感謝の意を表する次第である。松尾先生はマサ土の工学的研究の必要性を早くから認められ、昭和30年代にはすでに数々の成果をあげられていた。著者の研究に対しても常に暖かい御指導をいただいたものである。

松尾先生は昭和34年に関西地区の研究者、技術者からなるマサ土に関する研究グループを作られた。昭和41年にはこれが土質工学会調査部内のマサ土研究委員会へと発展し、昭和48年まで続いた。一方、昭和37年には日本材料学会に土質安定材料委員会が、そして昭和47年には日本石灰協会に石灰による土質安定処理委員会が発足し、今日まで続いている。松尾先生は、これらの委員会の長として、種々の示唆に富む勉学の場を与えて下さり、本論文作成の大きな原動力になった。これらの委員会の諸氏にも心より感謝いたしたい。

最後に、常に研究の便宜をはかっていただき、本論文作成に御協力をいただいた京都大学工学部土木工学教室松尾研究室に関係の各位ならびに明石工業高等専門学校土木工学科の各位に心から感謝するものである。

記 号

a_l	: 石灰添加量 (%)
(C)	: 任意の色
C	: 色(C)の値
D_M	: 平均粒径 (mm)
D_{20}, D'_{20}	: 破砕前後の20%径 (mm)
D_{50}, D'_{50}	: 破砕前後の中央径 (mm)
d	: 粒径, ふるい径 (mm)
E	: 突固め総仕事量 ($kq \cdot cm/cm^3$)
E_λ	: 分光エネルギー分布
e	: 反発係数
e_o	: 単位仕事量 ($kq \cdot cm/cm^3$)
F_a	: フライアッシュ添加量 (%)
f	: ふるいの残留率 (%)
G	: 平均比重
G_a	: みかけ比重
G_f	: フライアッシュの比重
G_l	: 石灰の比重
G_s	: 土粒子の比重
H	: 中央径の変化量
H_R	: ランマーの落下高さ (cm)
I	: 20%径の変化量
i_1	: Hamrol の風化度 (%)
K	: Iliew の風化度
N_B	: 一層当りの突固め回数
N_L	: 突固め層数
N_q	: 風化物中の 石英 / (石英 + 長石)
N_{qo}	: 母岩中の 石英 / (石英 + 長石)

n	:	有色鉍物量 (%)
n_w	:	吸水率 (%)
P	:	石灰反応率 (%)
$P_{0.42}$:	0.42mm以下の細粒分量 (%)
$P_{0.074}$:	0.074 mm 以下の細粒分量 (%)
p	:	純度 (%)
P_0	:	孔隙率 (%)
q	:	充填率 (%)
r	:	石灰充填材比 (%)
V	:	供試体の容積 (cm ³)
V_1	:	マサ土粗粒分の容積 (cm ³)
V_2	:	マサ土細粒分の容積 (cm ³)
V_a	:	空隙の容積 (cm ³)
V_f	:	フライアッシュの容積 (cm ³)
V_ℓ	:	石灰の容積 (cm ³)
V_{tg}	:	鉍物粒子の容積 (cm ³)
V_w	:	水の容積 (cm ³)
v_o	:	未風化岩の弾性波速度 (m/sec)
v_w	:	風化岩の弾性波速度 (m/sec)
W	:	供試体の湿潤重量 (g)
W'	:	供試体の水中重量 (g)
W_0	:	土粒子の表乾重量 (g)
W_1	:	供試体作成時の乾燥重量 (g)
W_2	:	所定日数養生後の供試体乾燥重量 (g)
W_ℓ	:	石灰の重量 (g)
W_R	:	ランマーの重量 (g)
W_S	:	土あるいは供試体の乾燥重量 (g)
W_{sat}	:	供試体の飽和重量 (g)
ΔW	:	重量増加量 (g)

w	:	含水比 (%)
w_{opt}	:	最適含水比 (%)
$(X), (Y), (Z)$:	X Y Z 系表色法における三原色
X, Y, Z	:	三原色(X),(Y),(Z)の割合, とくに Y は明度を表わす
X_d	:	Lomb の風化度
x, y	:	色度座標
$\overline{x}, \overline{y}, \overline{z}$:	スペクトル三刺激値
α	:	破砕率 (%)
β	:	残留率 (%)
γ	:	移動率 (%), 単位体積重量 (g/cm^3)
γ_d	:	乾燥密度 (g/cm^3)
γ_s	:	土粒子の単位体積重量 (g/cm^3)
γ_w	:	水の単位体積重量 (g/cm^3)
δ_w	:	重量増加率 (%)
θ	:	はね返り角 (度)
λ	:	波長 ($m\mu$)
λ_m	:	主波長 ($m\mu$)
ρ_λ	:	光の反射率 (%)